

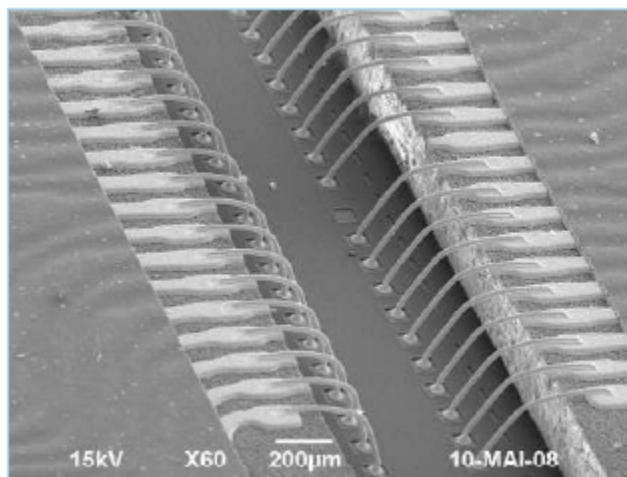


FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS



Estudo sobre a influência da composição e do diâmetro
do fio de ouro no processo *wirebond* e nas propriedades
finais da memória



-Tese de Mestrado Integrado-

Discente:
Orientador:

Bruno Alexandre Esteves Alves
Professora Filomena Viana

<i>CANDIDATO</i>	Bruno Alexandre Esteves Alves	<i>Código</i>	070508042
<i>TÍTULO</i>	Estudo sobre a influência da composição e do diâmetro do fio de ouro no processo <i>wirebond</i> e nas propriedades finais da memória.		
<i>DATA</i>	15 de Outubro de 2008		
<i>LOCAL</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala C-603- 16h00		
<i>JÚRI</i>	<i>Presidente</i>	Professor Doutor Luís Filipe Malheiros Freitas Ferreira	DEMM/FEUP
	<i>Arguente</i>	Professor Doutor Aníbal Guedes	DEM/UM
	<i>Orientador</i>	Professora Doutora Filomena Viana	DEMM/FEUP

1. Introdução	1
2. Estudo bibliográfico.....	6
2.1. Processo de Wirebond	6
2.2. Características do fio de ouro.....	8
2.3. Influência das características do fio na microestrutura da FAB e na formação da zona afectada pelo calor	12
2.4. Influência das características do fio na qualidade da ligação	14
2.5. Efeito da exposição a elevada temperatura na qualidade das ligações.....	17
3. Procedimento experimental.....	21
3.1. Descrição dos testes de controlo do processo de <i>wirebond</i>	21
3.1.1. Testes dimensionais da bola da 1ª ligação	21
3.1.2. Cálculo da cobertura dos intermetálicos ouro-alumínio	23
3.1.3. Teste de tracção.....	24
3.1.4. Teste de corte	24
3.1.5. Inspeções em MEV e por raio X.....	25
3.2. Descrição dos ensaios de fiabilidade.....	28
3.3. Critérios para validação dos fios.....	32
3.3.1. Critérios para validação do processo <i>wirebond</i>	33
3.3.2. Critérios para validação do funcionamento eléctrico do fio	35
4. Discussões dos resultados e conclusões parciais	37
4.1. Validação do fio GFC com diâmetro 23,5 µm.....	38
4.1.1. Validação dos parâmetros de <i>wirebond</i>	38
4.1.2. Validação do funcionamento do fio GFC 23,5 µm	44
4.2. Validação do fio HA5 de diâmetro 17,5 µm	48
4.2.1. Validação dos parâmetros de <i>wirebond</i>	48
4.2.2. Validação do funcionamento do fio HA5 17,5 µm	56
5. Conclusões.....	59
6. Recomendações.....	60
7. Referências bibliográficas	61
 Anexo A: Resultados dos ensaios de tracção e de corte para os fios GFC e HD5 de 23,5 µm de diâmetro.....	 63
Anexo B: Resultados dos ensaios de tracção para os fios HA5 de 19,5 e 17,5 µm de diâmetro.....	 64
Anexo C: Resultados dos ensaios de tracção para os fios HA5 de 19,5 e 17,5 µm de diâmetro.....	 65

AGRADECIMENTOS

Antes de mais, gostaria agradecer à minha superior hierárquica, Raquel Moura, por me ter permitido efectuar esta tese de Mestrado Integrado no meu local de trabalho e ter ajudado na definição do tema juntamente com a equipa de qualificações.

Gostaria enviar os meus agradecimentos ao responsável do departamento de investigação da QIMONDA PORTUGAL SA, Steffen Kroehnert, por ter sugerido, ao departamento de investigação da QIMONDA AG, que o estudo preliminar dos fios HA5 17,5 μm e GFC 23,5 μm fosse elaborado na QIMONDA PORTUGAL, e agradecer-lhe por ter disponibilizado a equipa de engenharia de processo, de análises físicas e de análises eléctricas, a qual forneceu um grande suporte para a realização dos testes de fiabilidade e das análises físicas dos fios.

Os meus agradecimentos vão também para o Miguel Labayen, por ter fornecido os fios de ouro utilizados no trabalho experimental desta tese, e pela sua disponibilidade.

Gostaria agradecer ao Alberto Martins por ter disponibilizado tempo de engenharia e de equipamento para processar os fios em “*wirebond*” e em “*mold*”.

Agradeço ao Nuno Leal e ao Carlos Delgado pela partilha de informação e de conhecimentos referentes ao processo de *wirebond*, assim como na elucidação do processo.

Gostaria agradecer a Oriza Tavares pela ajuda prestada na organização e no planeamento dos testes de fiabilidade, assim como agradeço também ao Fatmir Alijaj e a Andreia Vieira pelas análises físicas e eléctricas efectuadas nos fios de ouro.

Os meus agradecimentos vão também para a Professora Filomena Viana, orientadora da tese de Mestrado Integrado, por ter aceite a orientação deste trabalho assim como pelas correcções, sugestões e pela bibliografia cedida para o bom desenvolvimento do trabalho.

OBJECTIVO

Este trabalho tem como principal objectivo o estudo da influência da composição química assim como do impacto do diâmetro do fio de ouro, utilizado para estabelecer a ligação entre o *chip* de silício e os restantes componentes das memórias DRAM fabricadas pela QIMONDA PORTUGAL SA, no processo de ligação do fio de ouro ao *chip*, e nas propriedades finais do componente.

RESUMO

O mercado das memórias DRAM é muito exigente devido à redução do tamanho dos componentes e ao desenvolvimento permanente de novos produtos e novas tecnologias assim como devido à competitividade dos preços. Este trabalho explora a possibilidade de reduzir o preço das memórias produzidas pela QIMONDA PORTUGAL SA através da redução do preço das matérias-primas, em particular do fio de ouro utilizado para estabelecer a ligação entre o circuito integrado de silício e o resto do componente.

A introdução de um novo fio de ouro, com características próprias, na produção das memórias DRAM é acompanhada por testes de processabilidade, mecânicos, físicos, de fiabilidade e eléctricos de forma a proceder a validação dos critérios de aceitação do fio. De facto, o novo fio de ouro tem de garantir as mesmas funcionalidades eléctricas e de resistência mecânica durante o processo e, posteriormente, no cliente que o fio utilizado actualmente na produção.

Este trabalho testa dois fios de ouro: um fio do mesmo fornecedor mas de diâmetro menor ao do fio utilizado na produção, fio de composição HA5 e de diâmetro 17,5 μm , reduzindo desta forma o ouro utilizado para cada ligação; e o fio com mesmo diâmetro (23,5 μm) que o fio utilizado na produção (composição HD5) mas de fornecedor diferente, fio com composição química GFC e de diâmetro 23,5 μm , aumentando a competitividade dos preços entre fornecedores.

Ao longo deste trabalho, constatou-se que a ligação efectuada com o fio GFC é mais resistente que a do fio HD5 após a soldadura, no entanto durante a exposição à elevada temperatura, a integridade e a resistência mecânica das ligações, com o fio GFC, são piores comparando com as do fio HD5 utilizado na produção. De facto, quando sujeitos aos testes de fiabilidade, constata-se que as ligações do fio GFC não passam os critérios de aceitação após PRECON seguido de HTS durante 480 horas contrário ao fio HD5 que passou todos os critérios.

Verificou-se também que a diminuição do diâmetro do fio tem impacto no processo de *wirebond*. A força de rotura à tracção diminui com a diminuição do diâmetro do fio e aumenta com a exposição a elevada temperatura. A força de rotura ao corte diminui com a exposição a elevada temperatura. É de salientar que, neste trabalho, a redução do diâmetro do fio não teve impacto negativo na fiabilidade da ligação, no entanto observou-se que a alteração do fornecedor (composição química) teve um papel importante no comportamento da ligação nos testes de fiabilidade.

A QIMONDA PORTUGAL é actualmente a maior fábrica europeia de montagem e teste de produtos de memórias, pertencendo à multinacional QIMONDA AG, com sede na Alemanha. A produção de semicondutores, nomeadamente de memórias DRAM, é destinada a computadores, servidores e outros terminais digitais, como leitores de MP3, telemóveis, câmaras fotográficas digitais e consolas de jogos, entre outros.

O mercado das memórias é muito exigente devido à diversidade das aplicações, à competitividade de preços e à redução do tamanho dos componentes exigida pelas aplicações actuais. A QIMONDA PORTUGAL SA é uma empresa dinâmica e flexível, que aposta no desenvolvimento de novos materiais e produtos para fazer face a essas exigências.

O circuito integrado é a principal matéria-prima destas memórias, é nessa pastilha de silício que será armazenada toda a informação. Essa informação é transmitida aos módulos (placas de circuitos impressos) através de conexões entre o circuito integrado e o substrato e entre o substrato e os circuitos impressos. A ligação do circuito integrado de silício ao substrato é usualmente efectuada através de fios de ouro. Estes fios de ligação são produtos de precisão desenvolvidos para a indústria dos semicondutores. Durante o processo de montagem do componente e, particularmente durante o processo de soldadura, o rendimento tem de ser de 100%. Os produtores de semicondutores procuram maximizar esse rendimento optimizando a soldadura através da metalização do circuito integrado na zona de ligação. A selecção do fio (composição e diâmetro) tem também um papel crucial no aumento do rendimento.

Sendo o fio de ouro uma das matérias-primas mais caras, a redução do seu diâmetro implica uma apreciável redução de preço, conquanto a resistência mecânica garanta a integridade da ligação e do fio durante os processos produtivos posteriores e, ainda, no cliente. A utilização de fios de menor diâmetro contribui ainda para satisfazer as necessidades de redução de tamanho da tecnologia dos semicondutores.

1. INTRODUÇÃO

A descrição do fluxo produtivo das memórias DRAM, efectuada neste capítulo, visa enquadrar o processo de ligação do fio de ouro ao circuito integrado de silício (designado ao longo deste trabalho por *chip*) e ao substrato, assim como estabelecer a influência das restantes etapas do processo na qualidade desta ligação. No sentido de facilitar a descrição do processo, serão utilizadas as designações, em inglês, utilizadas na empresa.

Uma pastilha de silício “*wafer*”, tal como ilustra a figura 1, é um disco de silício monocristalino que é cortado, em média, em cerca de 500 *chips*. Cada *chip* contém um canal de ligação que pode ser observado, na vertical, na figura 2. Esse canal de ligação é constituído por 2 linhas paralelas de vários pontos de ligação (designados por *pads*), revestidos por um fino filme de alumínio, onde será soldado o fio de ouro.

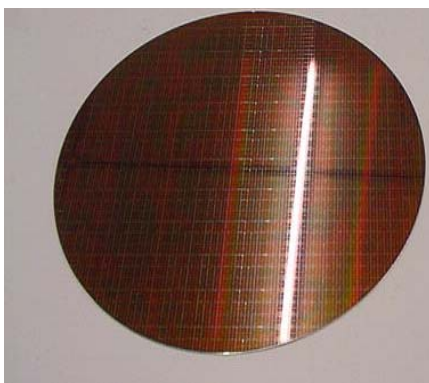


Figura 1 - Exemplo de uma *wafer*^[1]

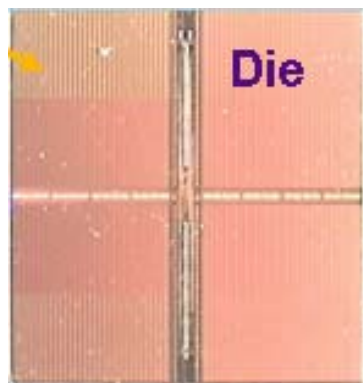


Figura 2 - Exemplo de um *chip*^[1]

Tomando como ponto de partida os *chips*, já cortados da *wafer*, e os substratos, as etapas de produção das memórias são descritas sequencialmente de a) a f).

a) Diebond

Operação de ligação dos *chips* ao substrato. Cada *chip* é colado no substrato, numa posição pré-definida no substrato, passando o conjunto a ser designado por unidade. O substrato, representado na figura 3, é o suporte principal do *chip* e é constituído por várias linhas de material condutor, usualmente cobre,

embebidas num material compósito polimérico. O substrato está presente em todas as etapas de montagem.

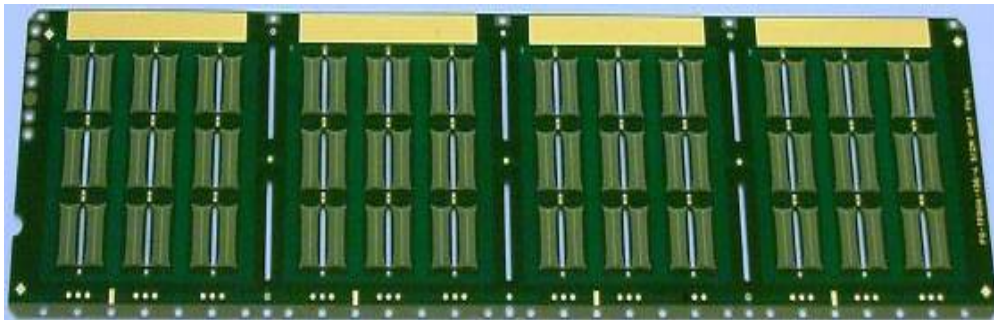


Figura 3 - Exemplo de um substrato constituído por 36 unidades (vista do lado do *chip*)^[1].

b) Wirebond

Antes da operação de *wirebond*, é efectuada uma limpeza do substrato por plasma (designada por *wireplasma*). Esta operação garante a remoção de qualquer tipo de contaminações nos pontos de ligações: no substrato e no *chip* (*pad*).

Após a operação de *wireplasma* é efectuado o *wirebond*, a operação de ligação de fios de ouro aos *chips* e aos substratos, assegurando a ligação eléctrica entre o *chip* e os restantes componentes das memórias. Nesta operação o “micro mundo” do *chip* é ligado ao “macro mundo” do substrato pelo intermédio do fio de ouro. Esta é a operação que é objecto de estudo no presente trabalho.

O fio de ouro é soldado aos *pads* de alumínio do canal de ligação do *chip* formando a 1ª ligação. A outra extremidade do fio é soldada a um contacto do substrato, designado por *finger*, formando a 2ª ligação. Na figura 4, é possível observar o lado inferior de uma unidade do substrato. A imagem da figura 2b) representa uma ampliação na qual se podem observar três ligações, entre o fio de ouro e o *finger* do substrato.

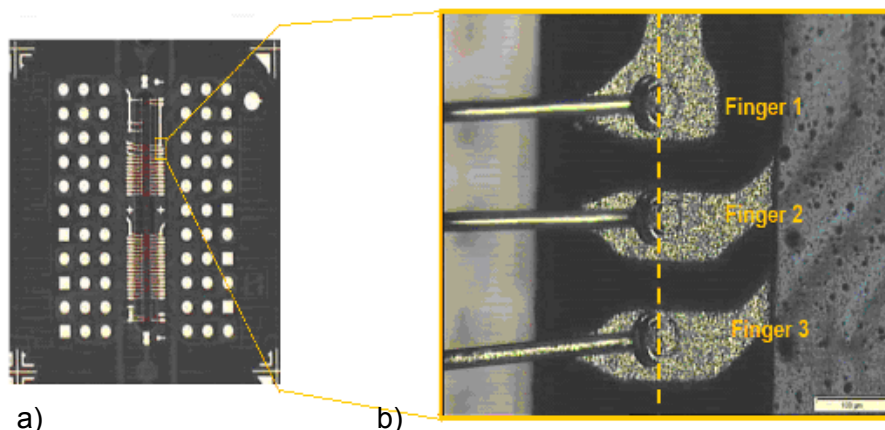


Figura 4 - a) Exemplo de uma unidade (vista do lado inferior), e b) ampliação da zona da segunda ligação ^[1]

c) Mold

Operação de encapsulamento do *chip* e da ligação do fio de ouro. Um polímero termoendurecível é injectado no substrato (ver figura 5 a) de forma a isolar/encapsular o *chip* e as ligações do fio de ouro de cada uma das unidades. No fim desta operação, e tal como se pode observar na figura 5 b), as unidades estão protegidas pelo material do *mold*. O material termoendurecível é injectado a elevadas pressões (7 - 9 MPa) sobre o *chip* e sobre o fio de ouro, já ligado ao *chip* e ao substrato. Se a viscosidade do termoendurecível e a força de injeção forem demasiada elevadas, os fios podem entrar em contacto (defeito de fios deitados) e criar um curto-circuito. Portanto, a resistência da ligação e do próprio fio também são testadas na operação de *mold*. Após esta operação, é efectuado a cura do termoendurecível designado por cura de *mold*. Esta etapa de produção é uma das que mais influencia a qualidade da ligação devido ao facto do substrato (assim como o fio de ligação) estar a 200°C durante 2 horas.

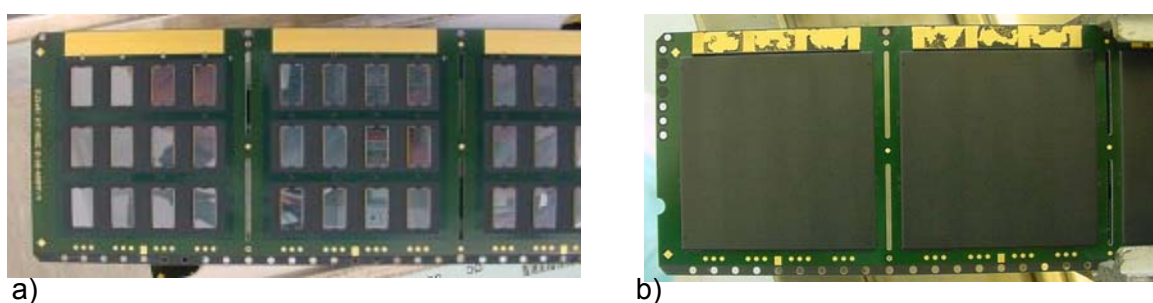


Figura 5 - Substrato antes a) após b) da operação de *mold* ^[1]

d) Ball attach

Operação de brasagem de bolas de solda ao substrato nas zonas de contacto das linhas de cobre ligadas ao *chip*. Estas bolas de solda, ligas de estanho e prata, são utilizadas posteriormente para estabelecer a ligação eléctrica entre os componentes e os módulos. As bolas de solda são colocadas sobre os *pads* dos substratos (de níquel revestido com um fino filme de ouro) e submetidas a um ciclo térmico de brasagem. Na figura 4, podem-se observar estes *pads*, representados por pontos esféricos amarelos. O ciclo térmico de brasagem também afecta a qualidade da ligação do fio de ouro.

e) Singulation

Operação de individualização de cada uma das unidades do substrato por corte do substrato. No fim da operação, cada unidade do substrato é designada por componente, cujo corte transversal está representado pelo esquema da figura 6.

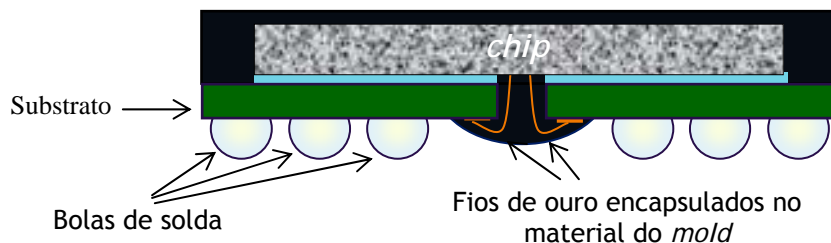


Figura 6 - Esquema do corte transversal de um componente após *singulation*.^[1]

f) Burn In, testes eléctricos e montagem em módulos

No final do ciclo produtivo, os componentes são submetidos ao teste de mortalidade infantil (*Burn In*), aos testes eléctricos a baixa e a alta temperaturas.

i) Burn In

Operação na qual é testado o tempo de vida do componente. Nesta operação, os mecanismos de falhas eléctricas são acelerados por temperatura (125°C) e

pela elevada voltagem utilizada. Os componentes que falharem o teste serão analisados e não passarão para os testes eléctricos seguintes. As falhas podem estar relacionadas com os processos ou com os materiais utilizados na montagem do componente, tal como o fio de ouro. ^[2]

ii) Testes eléctricos (U4 e U2)

Estes testes avaliam as várias funcionalidades do *chip* e todas as interligações tal como o fio de ouro. Nestes testes são testadas voltagens, correntes, retenção de memória a baixa (em U4 a -10°C) e alta temperaturas (em U2 a 95°C).

Após passarem estes últimos testes, os componentes de produção estão aptos para serem montados em módulos (ver figura 7). No caso de componentes com alterações de materiais ou de tecnologia (*chip*) é necessário efectuar testes adicionais, tais como os ensaios de fiabilidade.

Na montagem em módulos, a ligação entre o componente e o módulo é assegurada pelas bolas de solda (anteriormente ligadas ao substrato durante o processo de *ball attach*). Um módulo, como ilustra a figura 7, é constituído por vários componentes e é o produto final que será vendido para o cliente.

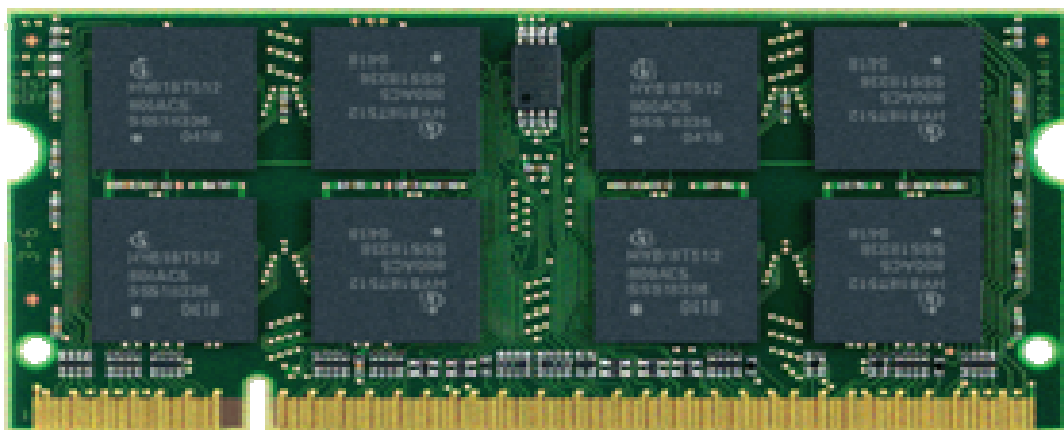


Figura 7 - Módulo constituído por oito componentes ^[1]

2. ESTUDO BIBLIOGRÁFICO

2.1. Processo de Wirebond

O objectivo do processo de *wirebond* é criar uma conexão eléctrica perfeita entre o *chip* e o substrato. Neste processo são efectuadas duas ligações por soldadura termossónica, uma primeira ligação é criada entre o *chip* e o fio de ouro e uma segunda ligação entre o fio de ouro e o substrato.

O processo é completamente automatizado: o *chip* é aquecido, o fio é comprimido contra o *pad* e a soldadura é efectuada com energia ultrasónica. A figura 8 ilustra o processo de *wirebond* em 8 passos ^[1]:

- a) O fio de ouro é enfiado numa fieira com um orifício designado por capilar que tem como função movimentar o fio e estabelecer a pressão durante a ligação. Na fase inicial é estabelecido um arco eléctrico, designado por “*Electronic Flame off*” (EFO) entre a ponta do fio (ou cauda) e um eléctrodo. A ponta do fio funde e forma uma bola designada por “*Free Air Ball*” (FAB). Os parâmetros do EFO: a descarga eléctrica (~ 400V), a densidade de corrente e a duração da descarga, determinam o tamanho e a forma da FAB.
- b) O capilar desce e pressiona a FAB contra o *pad* do *chip* (zona de ligação *chip*/fio). A superfície do *pad* é constituída por um filme fino de alumínio que serve de interface de ligação ao fio. O filme do *pad* é de alumínio devido a boa difusão à temperatura ambiente deste metal no silício (*chip*).
- c) Neste passo é efectuada a 1ª ligação (fio de ouro - *pad* de alumínio). O *chip* é aquecido, a FAB é pressionada contra o *pad* e é aplicada energia ultrasónica na ligação durante um tempo determinado. A ligação da FAB ao *pad* ocorre pela combinação da deformação plástica da FAB e da difusão interfacial entre os dois metais, promovendo a formação de compostos intermetálicos.
- d) O capilar sobe até uma altura previamente definida deixando assim um comprimento de fio livre para a formação do arco.
- e) Para formar o arco, o capilar dobra o fio e é movimentado na direcção do *finger* (zona de ligação do fio ao substrato) ao mesmo tempo que vai

aumentando o comprimento do fio entre as duas ligações. Neste passo, o próprio equipamento testa a passagem de corrente entre o fio e o *chip* pelo teste de *Ball Non Stick*.

- f) O fio de ouro é pressionado contra o *finger* e é efectuada a segunda ligação pelo mesmo processo da 1ª ligação, descrita no passo c). De referir que a metalização do *finger* é de ouro, ao contrário da do *chip* que é de alumínio.
- g) Depois de efectuada a segunda ligação, o capilar sobe até uma altura que determina o comprimento de fio necessário para o próximo ciclo. Neste passo é efectuado um teste de ligação, *Tail lift off* de modo a garantir que existe contacto eléctrico entre o fio e o substrato.
- h) O fio é cortado por tracção e o corte é garantido fazendo passar corrente tal como nos testes anteriores (teste de *Wedge non stick*). Neste caso não deverá ser observado nenhuma passagem de corrente, contrariamente aos anteriores.

É importante salientar que os testes, referidos nos passos e), g) e h), são efectuados automaticamente pelo equipamento.

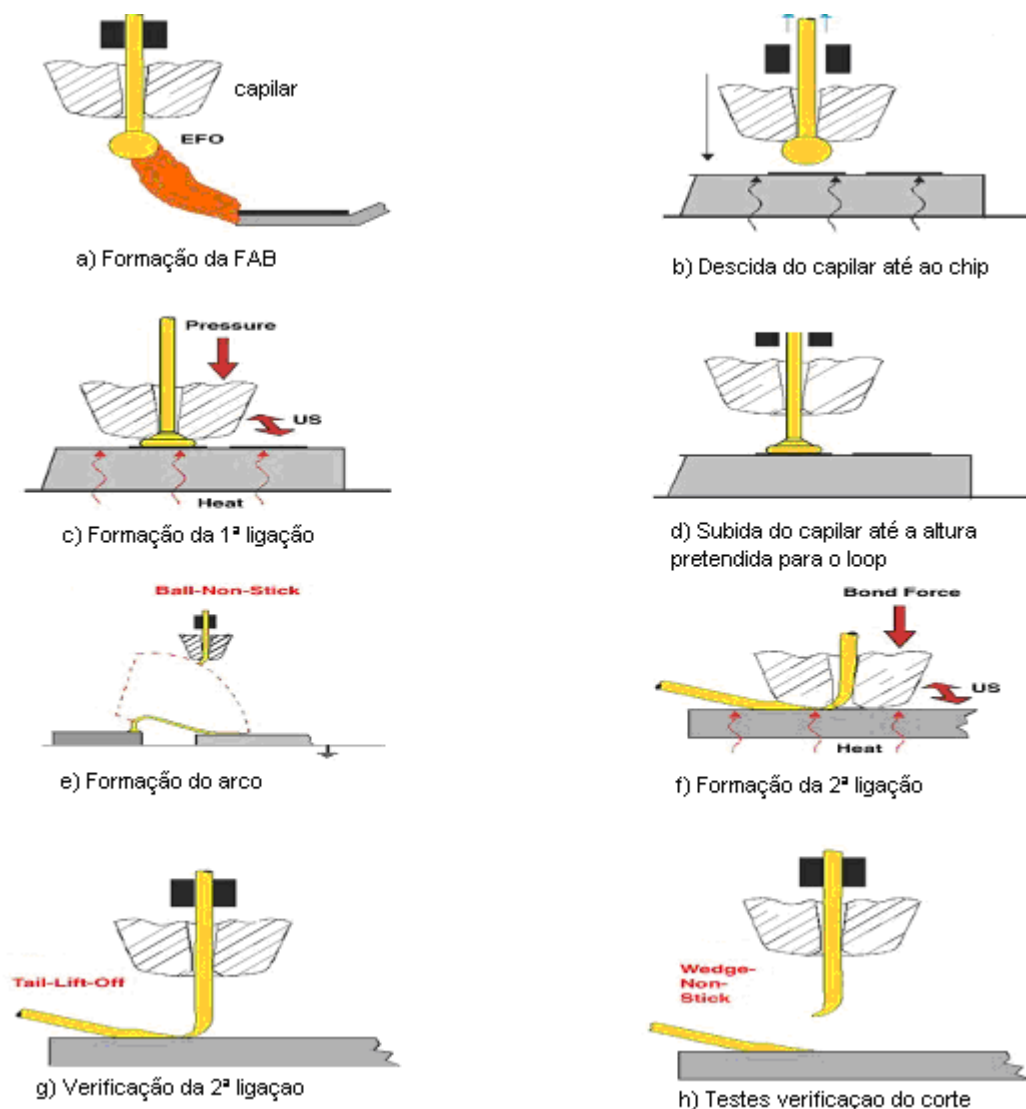


Figura 8 - Representação dos 8 passos do processo *wirebond*¹¹

2.2. Características do fio de ouro

Hoje em dia, devido à miniaturização crescente dos componentes electrónicos e à necessidade de redução de custos, as aplicações necessitam de componentes com ligações e com fios mais finos, possibilitando uma maior densidade de ligações. Os fios de ligação são responsáveis pela ligação eléctrica do *chip* ao resto do componente portanto esta ligação e o próprio fio têm de ter uma elevada capacidade de transporte de corrente, elevada resistência mecânica e à fadiga assim como uma elevada resistência à corrosão a longo termo. Assim a secção do fio e a sua composição são características importantes na selecção de um fio de ligação. A tabela 1

apresenta as propriedades de vários metais condutores relevantes para estas ligações. ^[3]

Tabela 1- Propriedades de metais para fios de ligação

Propriedades	Unidades	Au	Pd	Pt	Ag	Al	Cu
Ponto de fusão	°C	1063	1552	1770	961	658	1083
Condutividade térmica	Cal/cm.sec.°C	0,74	0,18	0,17	1	0,5	0,94
Condutividade eléctrica	10 ⁶ /mΩ	45,2	9,5	9,7	63	28	59,6
Módulo de elasticidade	GPa	79	124	173	82	71	123
Resistência à tracção	MPa	135	180	130	138	150	210

É importante salientar que não há um fio standard, a selecção do fio depende da metalização do *pad* do *chip*, do desenho e da construção do componente. As características mais relevantes para a selecção de um fio de ligação para a produção de memórias e com impacto nos processos produtivos são: o diâmetro, a composição química, as propriedades mecânicas, tais como tensão de rotura, módulo de elasticidade, e as propriedades eléctricas ^[3].

A maior parte das indústrias electrónicas utilizam o ouro como fio de ligação devido às suas boas propriedades, eléctricas, mecânicas (quando ligado com outros elementos), e devido à sua elevada resistência a corrosão. A vantagem do ouro relativamente ao cobre, de preço consideravelmente inferior, reside na sua maior resistência a oxidação.

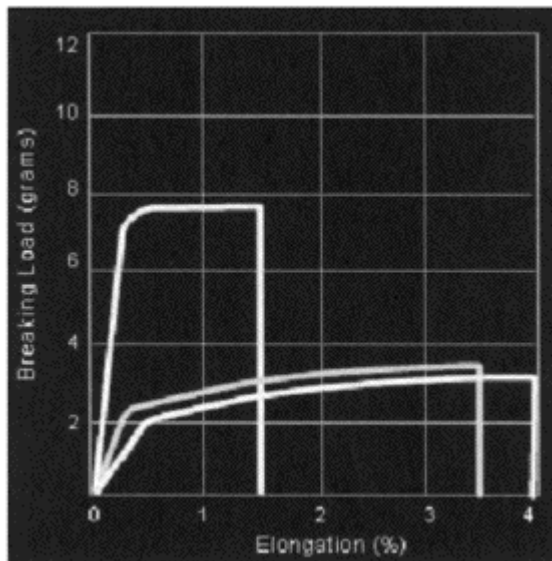
O fio de ouro, no seu processamento em *wirebond* e em *mold*, é sujeito a esforços mecânicos consideráveis. De facto, estas operações exigem a utilização de um fio de ligação com elevadas características mecânicas (resistência à tracção e módulo de elasticidade) para garantir a integridade da ligação assim como a estabilidade do arco do fio. Como é possível observar na tabela 1, o ouro puro tem um baixo módulo de elasticidade, comparado com os outros metais (cobre, paládio, platina), e devido a esta excessiva capacidade de deformação elástica, surgiu a necessidade de aumentar a resistência mecânica adicionando elementos de liga. Esses elementos de liga (berílio, cálcio, cobre, prata e paládio) também conhecidos por átomos dopantes, provocam um endurecimento por solução sólida, aumentando desta forma as propriedades mecânicas do ouro ^[3].

Devido às exigências do desenvolvimento de novas tecnologias (*chips*), o diâmetro do fio tenderá a diminuir e, de forma a contrabalançar a redução da resistência causada pela redução do diâmetro, a utilização de fios com a maior concentração em elementos de liga, será cada vez mais frequente.

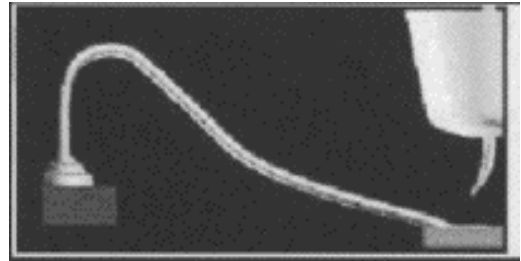
No entanto, a quantidade de elementos de liga deve ser controlada para manter uma boa condutividade eléctrica. De facto, a integridade do sinal eléctrico do componente depende das propriedades eléctricas do fio. O principal objectivo do fio é o transporte do sinal do *chip* para o substrato, na forma de corrente eléctrica, portanto a condutividade eléctrica do fio tem de ser a mais elevada possível.

É de salientar que a adição de elementos de liga diminui a condutividade do metal, no entanto, nem todos os elementos de liga têm o mesmo impacto na condutividade eléctrica de um metal puro. Por exemplo, a influência do paládio é mínima na diminuição da condutividade do ouro e pode, portanto, ser utilizado para aumentar a sua resistência mecânica. É de salientar que uma dureza demasiado elevada também não é recomendável, pois pode contribuir para a ocorrência de fissuras no *chip* (por baixo do *pad*) durante a 1ª ligação. Este defeito é conhecido por defeito *cratering*. Alguns estudos salientam que para minimizar a probabilidade de ocorrência desse defeito, as durezas do ouro e do alumínio devem ser aproximadamente iguais ^[4].

Durante o processo *wirebond*, os fios com tensão de rotura e dureza elevada e baixo alongamento (ver figura 9a) podem levar a problemas de falhas de ligação durante a 1ª e a 2ª ligação devido a baixa deformação plástica. Em casos extremos, se a rigidez for demasiada elevada, o fio poderá partir durante a formação do arco devido à elevada velocidade do processo. Ao contrário, os fios mais dúcteis, com alongamento elevado e baixa resistência mecânica, não partem durante a formação do arco mas podem flectir sob o próprio peso como mostra a figura 9 b). Estes fios têm problemas no processo de *mold* devido a ocorrência do defeito de fios deitados.



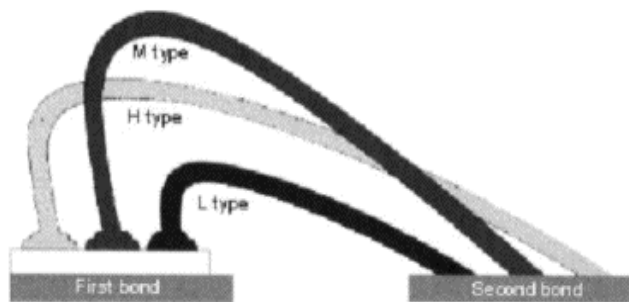
a)



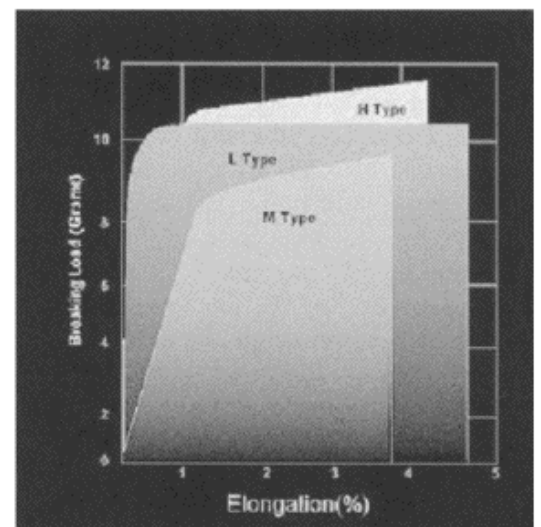
b)

Figura 9 - a) Curvas de força vs alongamento de um fio rígido e de dois fios dúcteis e b) fio com elevado alongamento ^[3]

Portanto, tal como apresentado pela imagem da figura 10a) e pelo gráfico da figura 10b), dependendo do alongamento, do módulo de elasticidade e da tensão de rotura, cada fio tem uma forma de arco específica. Para fios com elevada capacidade de deformação plástica, de forma a evitar problemas de fios deitados em *mold*, é preferível um arco tipo L, com menor altura e menor comprimento.



a)



b)

Figura 10 - a) Tipos de arco e b) respectivas curvas força vs alongamento ^[3]

2.3. Influência das características do fio na microestrutura da FAB e na formação da zona afectada pelo calor

Durante a formação da FAB, o fio é fundido e solidifica com um tamanho de grão mais elevado que o resto do fio; o calor gerado durante a formação da FAB altera a estrutura do fio adjacente, formando uma zona afectada pelo calor (ZAC) em que ocorre recristalização e crescimento de grão (ver figura 11) ^[3].

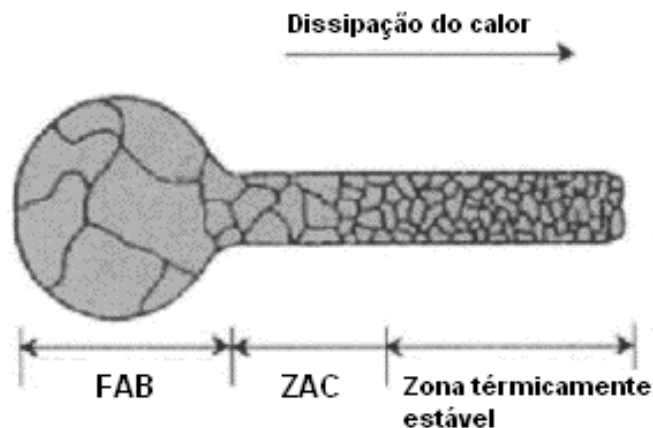


Figura 11 - Representação da microestrutura do fio após formação da FAB e da zona afectada pelo calor (ZAC) assim como da zona termicamente estável (fio) ^[3]

A ZAC é a zona mais frágil do fio, o seu comprimento influencia a altura do arco pelo simples facto deste só poder ser iniciado na zona com resistência mais elevada (com menor tamanho de grão) ou seja na zona estável termicamente de forma a evitar fractura do fio. Portanto, quanto maior o comprimento da ZAC maior tem de ser a altura do arco. O comprimento da ZAC é influenciado pelos parâmetros utilizados na formação da FAB: os parâmetros do EFO ^[3].

O EFO, *Electronic Flame Off*, é responsável pela fusão da extremidade do fio para a formação da FAB. De facto, como ilustra a figura 12, para um diâmetro de fio constante, um aumento dos parâmetros do EFO (intensidade de corrente e tempo) aumenta o diâmetro da FAB assim como o comprimento da ZAC. Portanto, para aplicações que necessitam arcos curtos, tipo L, não é aconselhada a utilização de parâmetros EFO elevados.

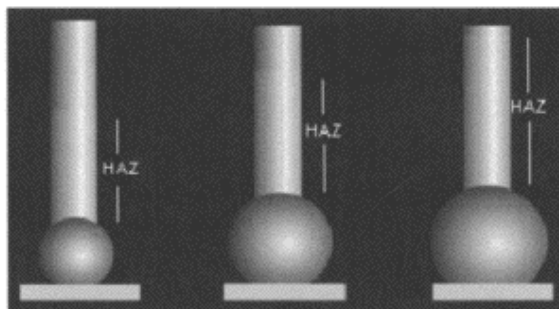


Figura 12 - Representação da variação dos diâmetros da FAB e do comprimento da ZAC, obtidas com parâmetros de EFO crescentes (da esquerda para direita) ^[3]

O efeito é o mesmo quando é pretendido manter o diâmetro da FAB constante utilizando diâmetros de fios menores. Para obter um mesmo diâmetro de FAB utilizando o fio de 17 μm de diâmetro foi necessário aumentar os parâmetros do EFO, resultando, num maior comprimento da ZAC, pois a quantidade de calor gerada é superior ^[3].

A temperatura de recristalização do fio também influencia o comprimento da ZAC. Como representado na figura 13, quanto mais elevada for a temperatura de recristalização do fio de ouro, menor é o comprimento da ZAC. Para uma temperatura de recristalização de 480°C o comprimento da ZAC é menor que para uma temperatura de 300°C diminuindo também a altura do arco. Uma temperatura de recristalização mais elevada implica uma menor zona afectada pelo calor, a recristalização é atrasada e o arco pode ser mais curto.

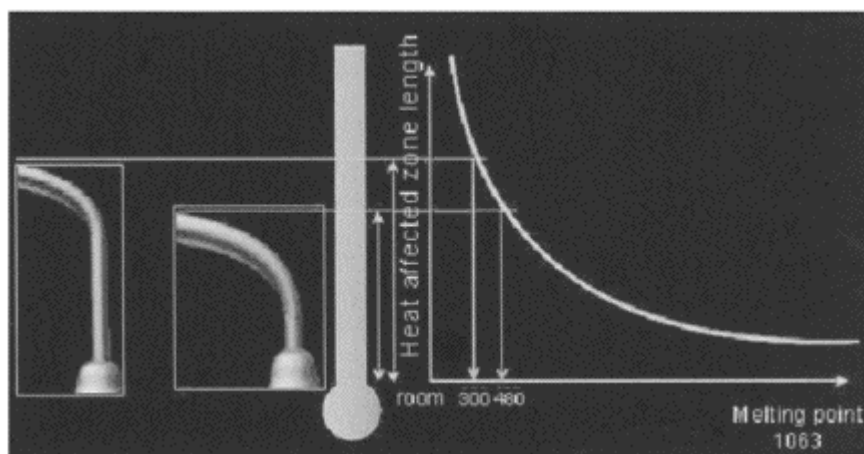


Figura 13 - Influência da temperatura de recristalização no comprimento da ZAC ^[3]

É de salientar que os elementos de liga, como apresenta a tabela 2, influenciam a temperatura de recristalização: o Be e Pb facilitam a formação de um arco mais curto porque aumenta a temperatura de recristalização para valores superiores a 300°C.

Tabela 2- Influência dos elementos de liga na temperatura de recristalização

Pureza do ouro	99,999%	99,995%			
Átomos dopantes		Ag, Pd, Pt	Mg, Ni, Si	Co, Cu, Fe, Ga, Ge, In	Al, Be, Ca, Pb, Sn, Ti
Temperatura de recristalização (°C)	150	150	150 a 200	200 a 300	Acima de 300

2.4. Influência das características do fio na qualidade da ligação

A composição química do fio também influencia a área de contacto do fio com o *pad* de alumínio devido a sua influência no tamanho de grão da FAB. Fios ligados com elementos endurecedores, que aumentam a temperatura de recristalização, possuem maior resistência e, quando é aplicada a pressão para formar a ligação, deformam-se menos e diminuem a área de ligação. Como ilustra a figura 14, um fio de elevada resistência mecânica, com uma ZAC curta e com uma FAB de elevada dureza forma uma bola da 1ª ligação de pequeno diâmetro. No entanto, uma ZAC maior e uma dureza da FAB menor dão origem a um maior diâmetro da bola da 1ª ligação. Portanto, quanto mais dúctil for o fio, devido a uma menor concentração em elementos de liga, maior é o comprimento da ZAC e mais fácil é a deformação durante o processo *wirebond*.^[3]

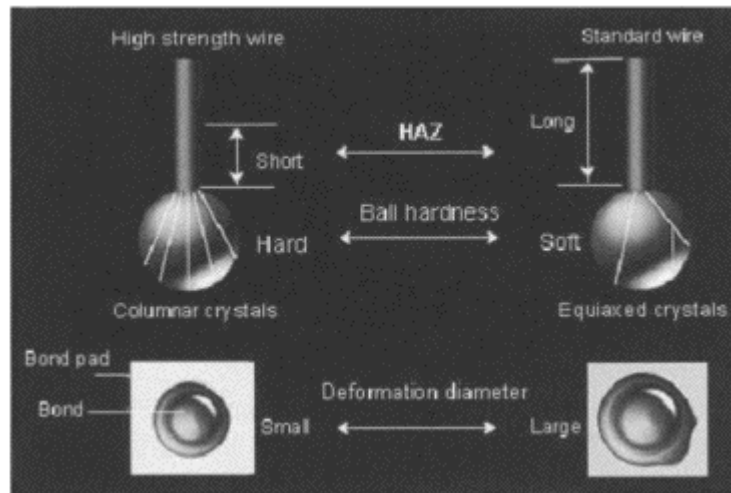


Figura 14 - Área da bola da 1ª ligação de um fio de dureza elevada (à esquerda) e dureza baixa (à direita): área de contacto depende do tamanho da FAB ^[3]

Durante o processo wirebond a FAB é esmagada contra o pad de alumínio, formando a bola da 1ª ligação. A área de contacto entre a FAB e o pad de alumínio depende dos parâmetros da soldadura termossônica (força, tempo e energia ultrasónica). O conjunto destes parâmetros, designado por *Ball Size Ratio* (BSR), controla a área de ligação para um determinado diâmetro da FAB. Quanto mais elevado for o BSR maior é o quociente entre a área de ligação e o diâmetro da FAB. É de salientar que o diâmetro da bola da 1ª ligação é sempre maior que o diâmetro da FAB devido ao seu esmagamento no *pad*. ^[4]

Durante o processo de soldadura termossônica ocorre a formação de uma camada de compostos intermetálicos na interface ouro/alumínio. Estes intermetálicos asseguram a ligação e são responsáveis pela qualidade da soldadura, quando maior for a área de ligação em que se formam os intermetálicos mais forte será a ligação. Os intermetálicos continuam a crescer ao longo da vida do componente até cobrirem totalmente a área de ligação entre o fio de ouro e o *pad* de alumínio. Este crescimento é acompanhado pelo aparecimento de defeitos, mais conhecidos por poros *Kirkendall*, o que pela sua vez piora a qualidade da ligação ^[4]. Este tema será discutido de forma mais detalhada no capítulo 2.5.

O impacto das características do fio na resistência mecânica das duas ligações é avaliado por testes de tracção e de corte. Como se pode observar pela figura 15, os valores da força de rotura, no eixo das ordenadas, diminuem com

a diminuição do diâmetro do fio e ligeiramente com o aumento do BSR. Podemos observar valores de 13 gf para o fio de 30 μ m até 6 gf para o fio de 20 μ m. De facto, devido a diminuição da secção do fio o teste de tracção apresenta valores menores ^[3].

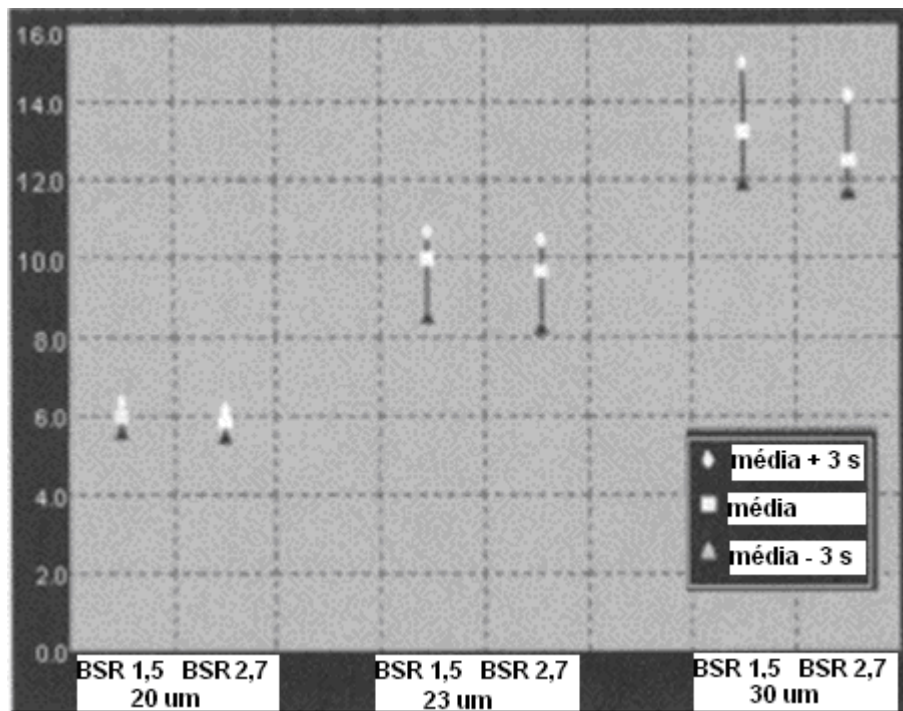


Figura 15 - Efeito do diâmetro do fio (20, 23, 30 μ m) e do BSR (1,5 e 2,7) na força de ruptura à tracção ^[3]

Durante o processo de soldadura termossónica é formada uma interface de compostos intermetálicos cuja área de cobertura é indicadora da ocorrência da ligação entre o fio e o *pad*. A resistência da ligação é avaliada pelo teste de corte (arrastamento da bola da 1ª ligação). Como ilustra a figura 16, o teste de corte é influenciado principalmente pelo diâmetro de contacto entre o fio e o *pad*, também designado por diâmetro da bola da 1ª ligação, e não depende directamente do diâmetro do fio nem da FAB. Da figura 16, podemos salientar que quanto maior for o diâmetro da bola da 1ª ligação maior será a força de corte.

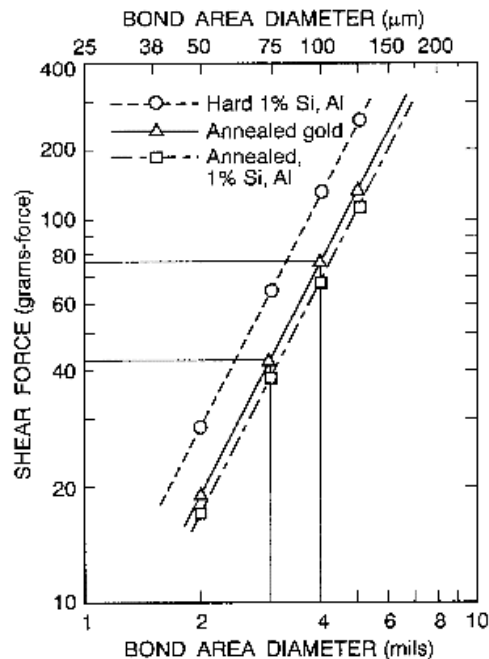


Figura 16 - Força de rotura ao corte em função do diâmetro da bola da 1ª ligação [4]

2.5. Efeito da exposição a elevada temperatura na qualidade das ligações

A exposição a elevada temperatura influencia a qualidade da 1ª ligação pelo facto de facilitar a difusão, promovendo o crescimento dos intermetálicos e a formação de poros de *Kirkendall*. Os compostos intermetálicos são formados por difusão que é facilitada pela presença de lacunas e acelerada pela temperatura. Os poros *Kirkendall* são formados devido à taxa de difusão do alumínio no ouro ser maior que a do ouro no alumínio, o fluxo de átomos é superior no sentido do ouro e o fluxo de lacunas é superior no sentido contrário, do alumínio. Exposições prolongadas a alta temperatura promovem uma extensa formação de lacunas que condensam sob a forma de poros. É de salientar que a temperatura não tem qualquer impacto na 2ª ligação devido a ser uma ligação ouro/ouro entre o ouro do fio e o filme de ouro do *finger*.

O gráfico da figura 17 apresenta os resultados obtidos num estudo realizado por White e citado em [4], que foca o efeito da exposição a 200°C na força de rotura à tracção e ao corte de uma ligação ouro/alumínio. Durante esta experiência, a resistência ao corte da ligação diminui de 80 gf para aproximadamente 32 gf até às 1344 horas e depois mantém-se constante. Os

autores verificaram que esta diminuição estava relacionada com a formação de poros.

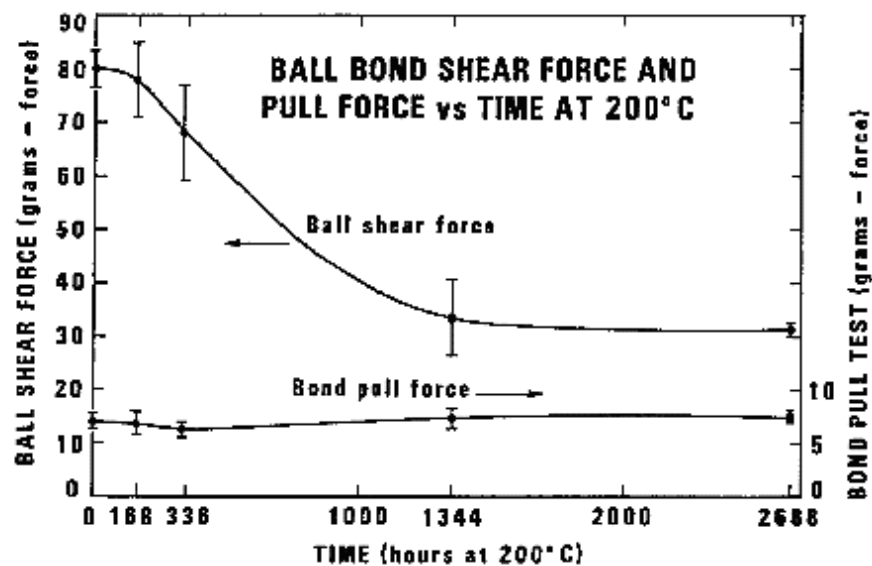


Figura 17 - Força de rotura da bola de 1ª ligação solicitada ao corte e à tracção em função do tempo de exposição a 200°C ^[4]

De facto, os compostos intermetálicos, após serem formados em *wirebond*, crescem com a exposição a elevada temperatura e, caso a área da cobertura dos intermetálicos, após *wirebond*, não seja elevada, poderão aparecer picos de intermetálicos e poros *Kirkendall* resultantes dum crescimento heterogéneo destes intermetálicos. É importante salientar que os parâmetros utilizados durante a formação da 1ª ligação influenciam a uniformidade dos compostos intermetálicos. As ligações efectuadas com compostos intermetálicos uniformes têm melhor comportamento durante o armazenamento à elevada temperatura, devido a não terem tensões internas que dificultam o crescimento dos intermetálicos ^[5].

Outro estudo ^[6] refere que, durante as primeiras 48 horas da exposição a 200°C, a interface ouro/alumínio não é alterada; com o aumento da exposição até às 240 horas, os compostos intermetálicos (Au_5Al_2) crescem verticalmente desde o *pad* de alumínio até ao ouro formando alguns poros *Kirkendall*; para exposições mais prolongadas os compostos intermetálicos transformam-se em compostos mais ricos em alumínio (Au_2Al), nesta fase o crescimento ocorre lateralmente. Quando a transformação dos intermetálicos Au_5Al_2 em Au_2Al ocorre, a formação dos poros *Kirkendall* é reduzida; pelo contrário se a

transformação não ocorrer, o crescimento dos intermetálicos ocorre na vertical e é acompanhado pela formação dos poros ^[5]. Outro autor, Philofsky, citado em ^[4] concluiu que, apesar da sua fragilidade, os compostos intermetálicos não têm efeito negativo na resistência ao corte, desde que não seja acompanhada pela formação excessiva de poros. Portanto, é conveniente obter uma elevada área de ligação com intermetálicos (80 a 90%) para garantir um crescimento vertical e lateral que evite uma formação massiva de poros. É também conhecido que a metalização do *pad* de alumínio influencia a formação dos poros *Kirkendall* e que uma forma de atrasar essa formação é diminuir a taxa de difusão adicionando átomos tais com: Sn, Zr, Ni, Cr, Mn e Si, ao *pad* de alumínio ^[7].

Relativamente aos resultados do teste de tracção realizados por White, citado em ^[4], podemos observar que os valores aumentam ligeiramente ao longo de 2688 horas. O autor verificou que este efeito está relacionado com as mudanças metalúrgicas da ZAC. A eliminação de tensões internas provenientes do processo *wirebond* pode ser uma das causas deste aumento da resistência à tracção. É de salientar que se houver crescimento de grão, a força de tracção diminuirá, ao contrário, o aumento da força de tracção revela que a ligação tem uma boa integridade mecânica e metalúrgica^[8]. Sabendo que o teste de tracção avalia a resistência da ZAC assim como a resistência da 1ª ligação, e que a ZAC é, a maior parte das vezes, menos resistente que a 1ª ligação, a qualidade da 1ª ligação é raramente testada. De facto, este ensaio é mais dedicado para testar a resistência da ZAC e da 2ª ligação ^[4]. Outro autor, Horsting também citado em ^[4], descobriu que se a ligação for bem efectuada e se não houver impurezas na interface ouro/alumínio, a ligação não se deteriorará por exposição a elevada temperatura. Ao contrário se houver impurezas no *pad* de alumínio e se a ligação não for bem efectuada então a resistência da ligação pode degrada-se rapidamente durante as primeiras hora de exposição a alta temperatura. Impurezas tais como Ni, Fe, Co, B, difundem-se rapidamente do *pad* para o fio de ouro e dependendo da concentração, podem precipitar e favorecer a formação de poros. ^[4].

As falhas eléctricas, relacionadas com a 1ª ligação, ocorrem por baixa condutividade eléctrica (a) ou baixa resistência mecânica (b):

- a) A ligação pode ser forte mecanicamente mas pode ter baixa condutividade eléctrica. Na figura 18, podemos observar que inicialmente a resistividade é de alguns mΩ, mas com a elevação da temperatura para 200°C visualizamos o aumento da resistividade com o tempo para 8mΩ (1º patamar) devido ao crescimento dos intermetálicos. O segundo aumento da resistividade ocorre devido ao crescimento contínuo dos intermetálicos ao longo do pad de alumínio, para fora da zona de ligação. Este crescimento excessivo é acompanhado pela formação intensa de porosidades que interrompem a ligação diminuindo o fluxo eléctrico e provocando a falha do componente (2º patamar).

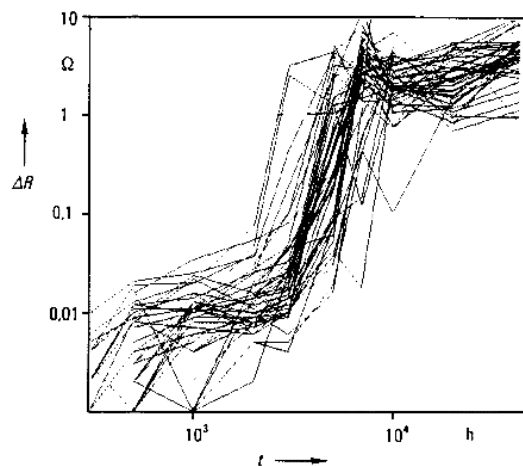


Figura 18 - Resistividade eléctrica em função do tempo ($T^{\circ}\text{C} = 200^{\circ}\text{C}$) ^[4]

- b) A ligação pode, também, falhar devido a sua baixa resistência mecânica. Os poros *Kirkendall* crescem e acumulam-se na zona da ligação. Estes poros aparecem devido ao facto dos intermetálicos terem um crescimento heterogéneo, efectuado verticalmente (do *pad* para o fio), formando picos de intermetálicos e poros *Kirkendall*, responsáveis pela rotura mecânica da ligação.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo estão descritos todos os testes efectuados para o estudo e validação dos fios no processo de *wirebond* assim como para a validação do funcionamento eléctrico dos fios. Para tal, este trabalho experimental foi dividido em duas partes: uma parte na qual o fio é testado em substrato para a validação do processo de *wirebond* e outra parte em que o fio é testado em componentes para a validação do funcionamento eléctrico do fio.

3.1. Descrição dos testes de controlo do processo de *wirebond*

O controlo do processo de *wirebond* foi efectuado posteriormente à soldadura da 1ª e da 2ª ligação. A resistência mecânica das ligações foi testada por ensaios mecânicos: o teste de tracção do fio e teste de corte da bola da 1ª ligação cuja altura e diâmetro foram também medidos através de testes dimensionais. A qualidade da ligação também foi avaliada pelo cálculo da fracção da área da 1ª ligação (compostos intermetálicos) e pela medição das porosidades, formadas na 1ª ligação, por imagens do corte longitudinal da ligação observadas em microscopia electrónica de varrimento (MEV). De forma a obter uma visão global sobre as ligações foram efectuadas inspecções em MEV das ligações e da área de contacto com o alumínio para determinar a existência de fissuras (teste “*Cratering*”).

É de salientar que a 2ª ligação é menos crítica que a 1ª devido ao facto ser uma ligação entre o ouro do fio e o ouro do *finger*, não ocorrendo formação de compostos intermetálicos. Para esta 2ª ligação foram controladas: a resistência mecânica pelo teste de tracção e a ligação através da inspecção por MEV da forma da ligação.

3.1.1. Testes dimensionais da bola da 1ª ligação

Após o processo *wirebond*, de forma a garantir os requisitos mínimos dimensionais da bola da 1ª ligação, são efectuadas medições do diâmetro e da altura da bola. A figura 19 representa esquematicamente estas duas dimensões.

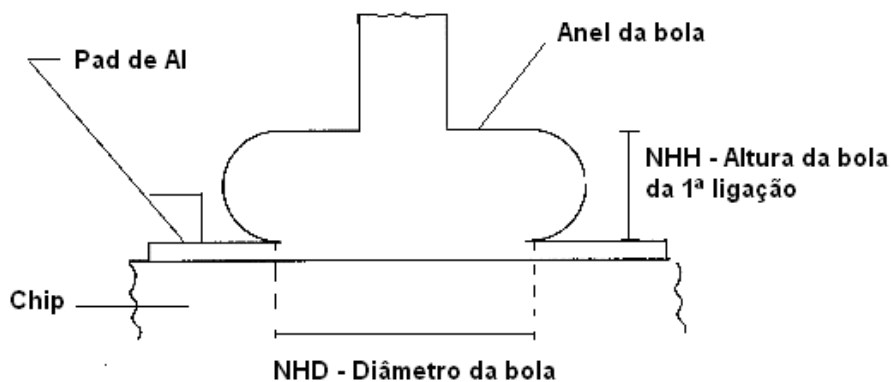


Figura 19 - Representação da medição da altura NHH e do diâmetro da bola NHD

Na linha de produção, a altura da bola da 1ª ligação é medida num microscópio óptico com uma ampliação de 100x. Este microscópio está ligado a um sistema de medição nos 3 eixos X,Y e Z que por diferença de focagem ao longo do eixo do Z, determina a altura da bola. Como se pode visualizar na figura 20, é efectuada a primeira focagem no *pad* de alumínio e a segunda na parte superior da bola. A diferença da altura de focagem corresponde à altura da bola.

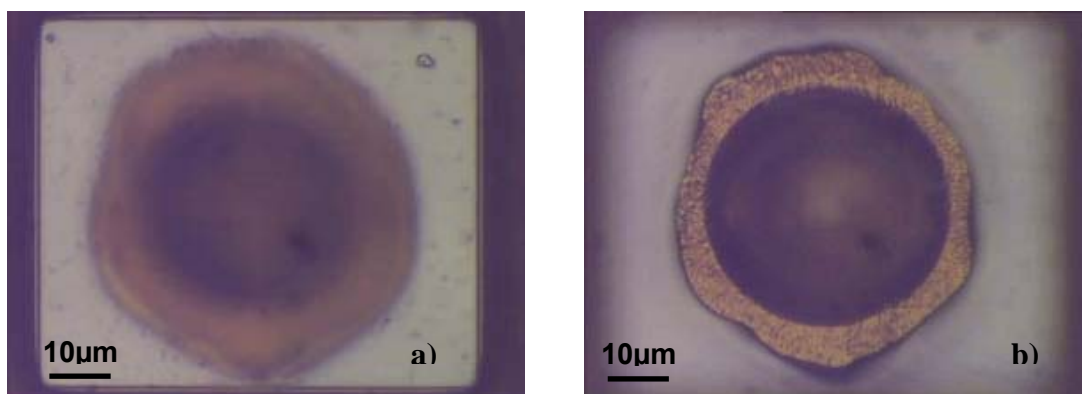


Figura 20 - Processo de medição da altura da bola da 1ª ligação: focagem do *pad* de alumínio (a) a branco na imagem focagem da parte superior da bola (b), a diferença da cota mede a altura da bola.

A medição do diâmetro da bola é efectuada no mesmo equipamento. Neste caso, como apresenta a figura 21, é focada a parte superior da bola e são lidos 3 pontos (3 vértices dum triângulo) que a aplicação informática usa para determinar o diâmetro do círculo que passa por esses 3 pontos.

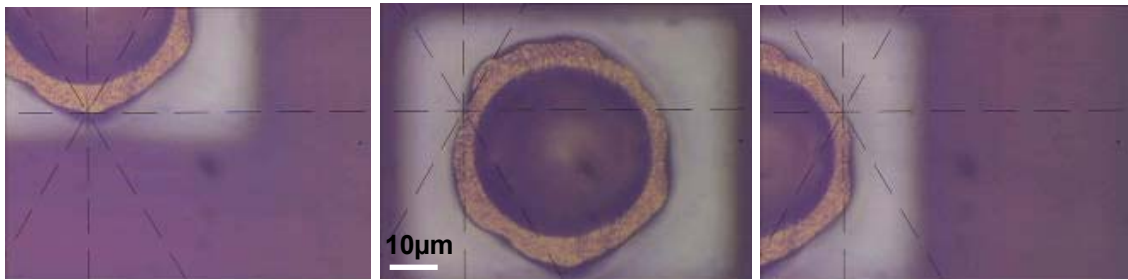


Figura 21 - Determinação do diâmetro da bola: marcação de 3 pontos do contorno exterior do anel que são usadas para medir o diâmetro.

3.1.2. Cálculo da cobertura dos intermetálicos ouro-alumínio

A ligação entre o *chip* e o fio de ouro é estabelecida através da formação duma camada de compostos intermetálicos de ouro e de alumínio. Neste teste é determinada a percentagem da área de ligação em que se formam os intermetálicos.

Antes de determinar a área dos intermetálicos, é necessário efectuar a preparação da bola de 1ª ligação, como ilustrado pela figura 22. Para tal, corta-se uma unidade do substrato que é mergulhada numa solução de 50% em volume de HNO₃ (65%) e 50% de HF (50%), à temperatura ambiente durante 3 minutos. O *chip* é dissolvido pela solução e após a limpeza do substrato e fio com água destilada e secagem dos mesmos, observa-se e calcula-se a área de cobertura dos intermetálicos ao microscópio óptico com uma ampliação de 50x.

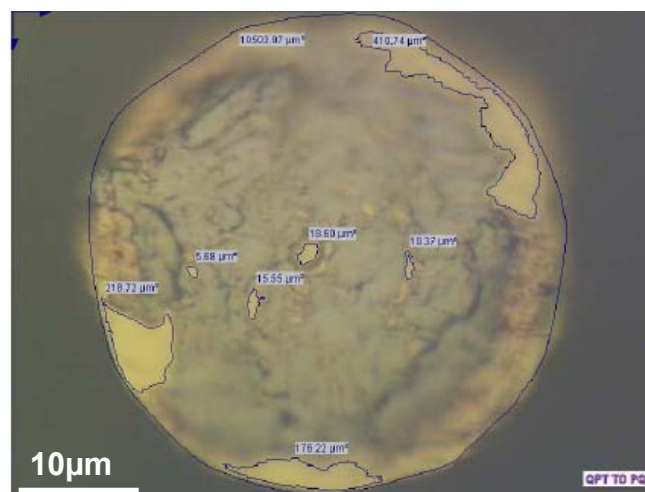


Figura 22 - Vista transversal na zona dos intermetálicos (a castanho) da bola da 1ª ligação (microscópio óptico 50X) e determinação dos perímetros que delimitam a zona de ligação em que se formam intermetálicos.

Para o cálculo da percentagem de cobertura dos intermetálicos, mede-se a área das partes douradas (correspondentes ao ouro) e a área total da ligação.

Estima-se que a 1ª ligação é de boa qualidade se a fracção da área dos intermetálicos for superior a 65% [4].

3.1.3. Teste de tracção

O teste de tracção, como ilustra a figura 23, é um teste de levantamento do fio efectuado após o processo de *wirebond*. Neste teste é essencial garantir que o gancho (peça metálica que aplica a carga) está exactamente no centro do arco de forma a testar as duas ligações. A maior parte das vezes o gancho desloca-se para o ponto mais alto do arco e a força é aplicada directamente na ZAC e na 1ª ligação. Tipicamente, o fio parte pela ZAC sendo esta a parte menos resistente do fio.

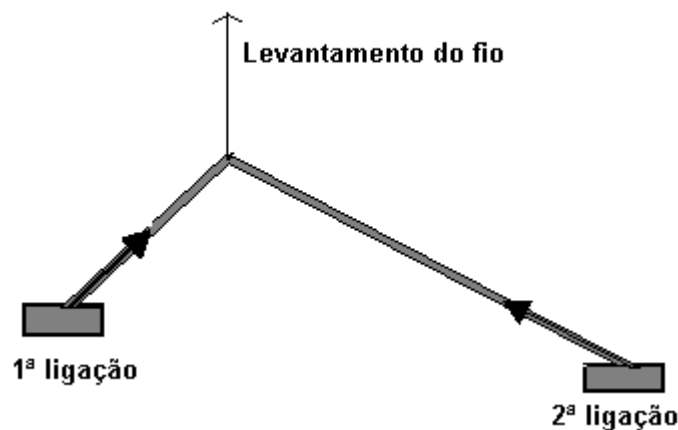


Figura 23 - Esquema do teste de tracção [9]

3.1.4. Teste de corte

O teste de corte é um teste de arrastamento da bola da 1ª ligação, através do qual é testada a resistência ao corte da ligação. Como ilustra a figura 24, a agulha de arrastamento é colocada a uma altura de 2,5 μm do polímero (protector da área activa do *chip*), e bate contra a bola na zona dos intermetálicos exercendo a força necessária para cortar toda a ligação.

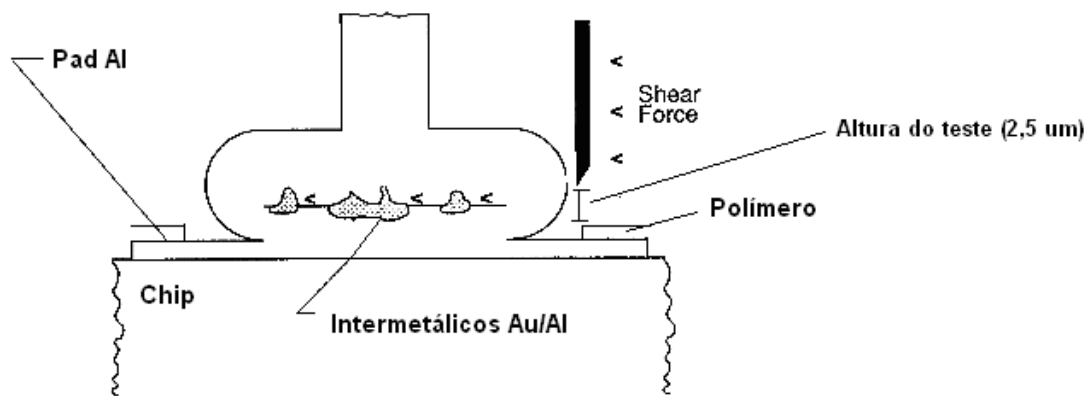


Figura 24 - Teste de corte com altura da bola adequada: teste efectuado na linha dos intermetálicos

3.1.5. Inspeções em MEV e por raio X

As quatro inspeções, descritas neste capítulo, são: a inspeção do *pad* do *chip* (teste *cratering*), a inspeção do corte longitudinal do fio, a inspeção global do canal de ligação em MEV e inspeção por raio X.

O teste *cratering* serve para avaliar o impacto dos parâmetros (força, tempo e energia ultrasónica) utilizados na soldadura da 1ª ligação no *chip* de silício. De forma a poder observar eventuais danos, fissuras por baixo do filme de alumínio de contacto com o *chip*, corta-se uma unidade do substrato, mergulha-se a unidade numa solução de 2ml de HNO₃ (65%) com 30ml de H₃PO₄ (85%) e 5ml de água destilada durante 15 minutos a uma temperatura entre 70-90°C. Após a remoção do ouro e do alumínio, limpa-se a amostra com água destilada e acetona. Antes de se proceder a observação das fissuras, é necessário revelá-las e para tal coloca-se a unidade numa solução KOH (10g KOH+ 90g H₂O) durante 5 minutos à uma temperatura perto dos 90°C. A amostra é então limpa com água destilada e acetona, revestida com platina e observada em MEV (ver figura 25). Os *pads* que apresentam manchas escuras revelam presença de fissuras; os que estão isentos de manchas não apresentam fissuras.

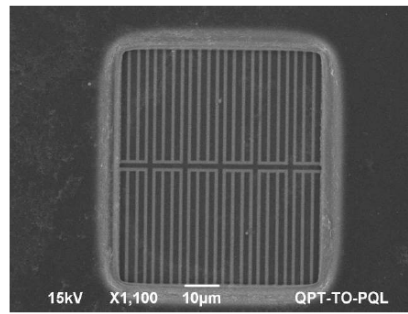


Figura 25 - Imagem MEV do *pad* do *chip* após remoção do filme de alumínio

A inspecção em MEV da secção da primeira ligação, tal como apresenta a figura 26, é efectuada após vários polimentos sequenciais. Através da imagem MEV pode-se observar a evolução dos intermetálicos após os vários ensaios de fiabilidade efectuados. Esta imagem é utilizada para revelar o potencial aparecimento de poros *Kirkendall* ou de fissuras na linha dos intermetálicos. A qualidade da ligação é avaliada através da medição do espaçamento entre poros, ao longo da linha formada pela camada de intermetálicos, na imagem de MEV. O somatório dos comprimentos medidos, designado por comprimento sem poros no decorrer deste trabalho, tem de ser superior a um critério estabelecido.

Para obter uma imagem da secção transversal do fio, corta-se uma unidade do substrato, monta-se em resina de forma a que a secção transversal seja paralela ao canal de ligação para se tentar observar o maior número de fios possível. Após a montagem estar pronta, efectuam-se as várias etapas de polimento:

1- Polimento com lixas e panos:

- a. Polir a unidade até a ultima linha de *pads* das bolas de solda com lixa de 180 mesh;
- b. Polir com lixa de 500 mesh até os *fingers* do substrato;
- c. Polir com lixa de 1000 mesh o fio de ouro até ao início do arco;
- d. Do início do arco até aparecer a bola da 1ª ligação, polir com lixa de 2500 mesh;
- e. Polir a bola com lixa de 4000 mesh e passar para panos embebidos em abrasivo com granulometria-de 3µm e 1µm.

2- Polimento por bombardeamento iónico:

- a. Durante 10 minutos para limpeza da superfície polida;
- b. Durante 5 minutos para aumentar contraste entre fio de ouro e intermetálicos.

Após o polimento, a amostra é revestida com platina para possibilitar a sua observação no microscópio electrónico de varrimento.

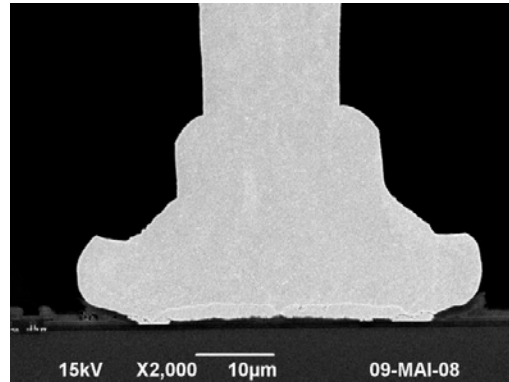


Figura 26 - Imagem MEV do corte da secção transversal da bola da 1ª ligação

A inspecção do canal de ligação em MEV é efectuada após o processo de *wirebond* e tem por objectivo, tal como mostra as figuras 27 a) e b), a observação do aspecto externo das duas ligações assim como a forma do arco do fio de ligação.

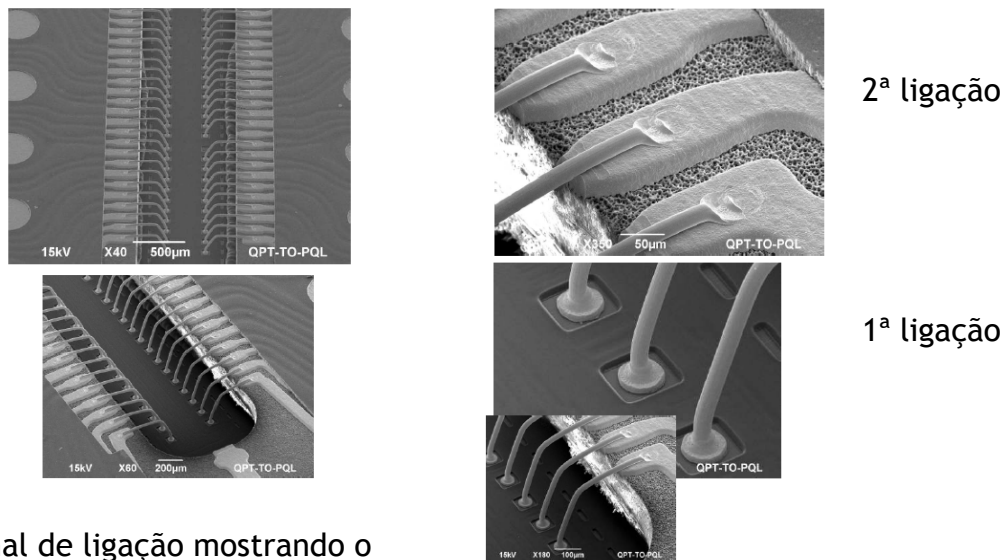


Figura 27 - Imagens obtidas por MEV do canal de ligação, da 1ª e 2ª ligação e do arco formado entre as duas ligações

A inspecção por raio X é efectuada após o processo de *mold*. Os substratos, com *mold*, são colocados num equipamento de raio X, através do qual é

possível obter uma imagem dos compostos metálicos presentes no substrato, tal como ilustrado na figura 28.

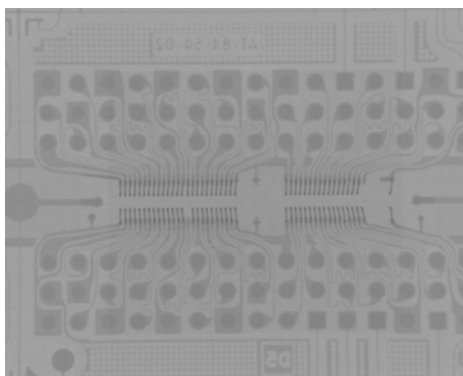


Figura 28 - Imagem de raio X duma unidade dum substrato após *mold*

3.2. Descrição dos ensaios de fiabilidade

Antes de mais, é importante definir o conceito de fiabilidade. Fiabilidade é a capacidade de uma peça, componente ou produto desempenhar as suas funções sem falhas durante um período de tempo determinado e em ambientes específicos ^[10]. São designados por ensaios de fiabilidade, os testes que simulam as condições de utilização do componente, desde a sua saída da fábrica até ao seu fim de vida. Os testes de fiabilidade considerados neste trabalho são:

- o ensaio de pré-condicionamento;
- o ensaio de armazenamento a alta temperatura;
- o ensaio de fadiga térmica;
- o ensaio de resistência a oxidação.

Após a realização destes ensaios, a qualidade da ligação é avaliada pelos testes eléctricos U4 e U2 (já descritos no capítulo 1) e também pela a inspecção da bola da 1ª ligação de forma a observar o impacto dos ensaios de fiabilidade no crescimento da camada de intermetálicos e na formação de poros. A figura 29 representa o fluxograma da montagem do componente até os ensaios de fiabilidade, como podemos constatar o teste PRECON é efectuado antes de qualquer outro ensaio de fiabilidade.

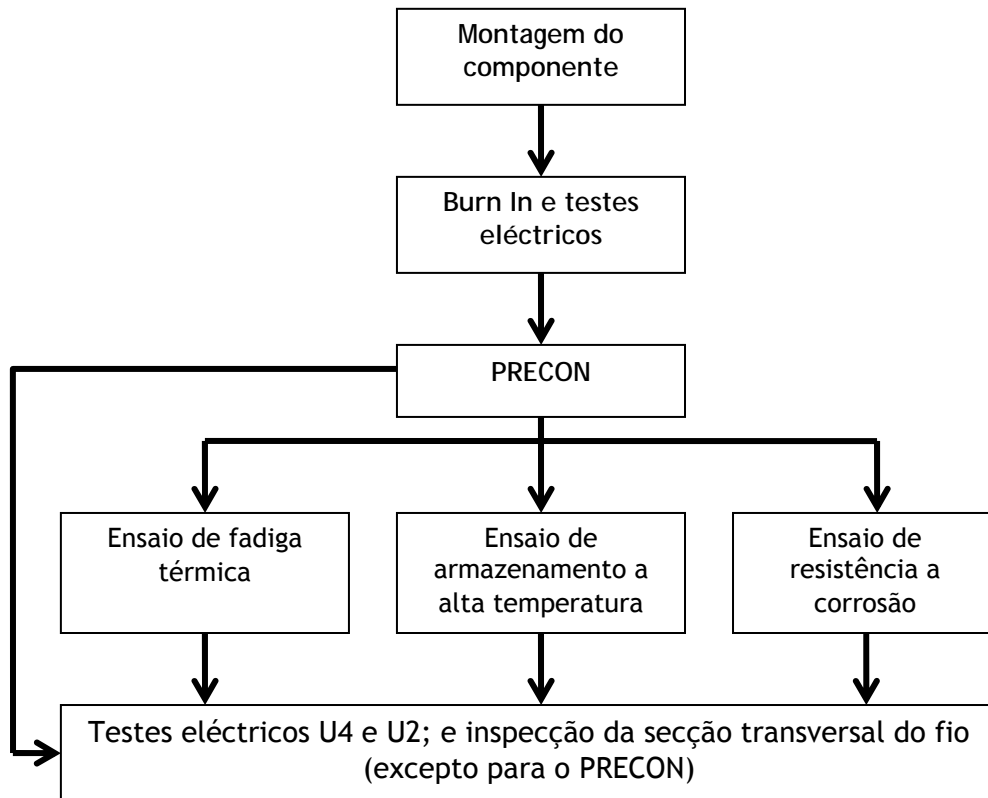


Figura 29 - Representação do fluxo do componente desde a montagem até aos ensaios de fiabilidade

O ensaio de pré-condicionamento (PRECON) simula as condições de transporte aéreo e o processo de montagem do componente no módulo. A simulação das condições de transporte aéreo é necessária devido ao facto do componente singularizado efectuar a montagem no módulo noutra fábrica e ter de ser transportado via aérea. Numa segunda etapa o ensaio PRECON também simula as condições do processo de montagem no módulo durante o qual as bolas de solda colocadas no processo de *ball-attach* são soldadas no módulo.

O PRECON detecta defeitos que não são detectáveis durante o processo produtivo do componente, e que unicamente seriam revelados durante a montagem em módulos.

O ensaio PRECON é constituído por duas etapas. Na primeira etapa, o componente é sujeito a 5 ciclos térmicos (ver figura 30) que simulam as variações de temperatura as que os componentes estão expostos desde o início do transporte até a sua montagem em módulos. Os ciclos térmicos consistem no aquecimento até atingir a temperatura de 125°C (+10°C).

Seguido por um arrefecimento até aos -55°C (-10°C); são efectuados dois ciclos por hora.

Na segunda etapa, o componente é sujeito às condições da soldadura durante a montagem em módulos que conta três passos.

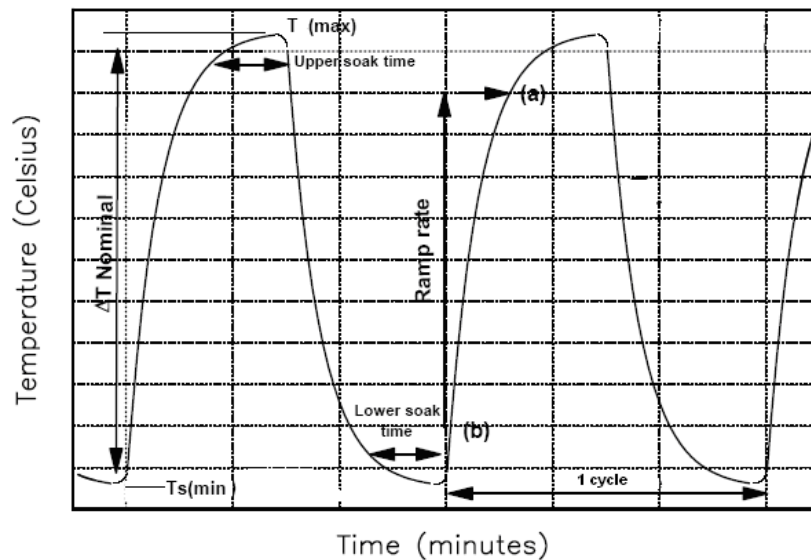


Figura 30 - Representação de dois ciclos térmicos ^[11]

O primeiro passo é a secagem do componente durante a qual é removida toda a sua humidade interna. Neste trabalho a temperatura de secagem foi de 125°C ($+5^{\circ}\text{C}$) durante 12h ^[11].

O segundo passo é a humedificação durante a qual é colocada uma quantidade controlada de humidade dentro do componente. Esta humedificação tem de ser efectuada no período de 2 horas após a secagem. Neste trabalho a humedificação é efectuada à temperatura de 30°C ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) e a uma humidade relativa de 60% ($\pm 3\%$) durante 192 horas ^[11].

O terceiro passo simula o processo de soldadura entre as bolas de solda do componente e o módulo. Este passo tem de ser efectuado num período mínimo de 15 minutos e no máximo de 4 horas após a humedificação. No caso deste período não ser respeitado, o componente tem de efectuar a secagem e a humedificação novamente. Entre cada ciclo, o componente tem de ser arrefecido até temperatura ambiente.

Durante a simulação do processo de soldadura em módulos, o componente é sujeito a 10 ciclos térmicos (ver gráfico da figura 31). A temperatura máxima atingida durante o ciclo é de 260°C (-5°C) durante 20 segundos ^[11].

Após este último passo, os componentes são testados electricamente e só passam para o ensaio de fiabilidade seguinte se não falharem os testes eléctricos U4 e U2.

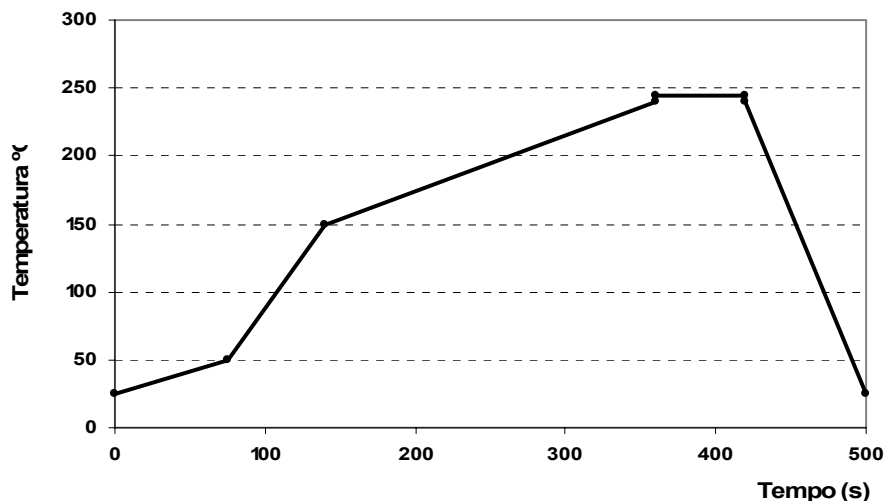


Figura 31 - Perfil de temperatura dum ciclo de simulação do processo de soldadura em módulos

Os ensaios de fadiga, na indústria de semicondutores, consistem em ciclos térmicos e são utilizados para revelar potenciais fissuras ou fracturas no componente ou nos compostos intermetálicos ^[12]. As fissuras podem ocorrer devido ao facto dos compostos intermetálicos de alumínio e ouro terem coeficientes de expansão térmica diferentes. Os compostos intermetálicos são mais resistentes mecanicamente que o ouro ou alumínio puros, no entanto são também mais frágeis e são mais susceptíveis à fractura durante os ciclos térmicos que os respectivos metais puros. O número de ciclos do ensaio de fadiga térmica efectuado neste trabalho foram 500 e é denominado da seguinte forma: TC500 onde TC significa *temperature cycling* e 500 o número de ciclos. No fim destes ciclos são sempre efectuados os dois testes eléctricos U4 e U2 de forma a detectar falhas eléctricas originadas pelas tensões geradas durante os ciclos térmicos. O ensaio de fadiga térmica consiste em sujeitar os componentes a variações bruscas de temperatura, desde de 125°C (+10°C) até

-55°C (-10°C) e vice-versa, provocando um choque térmico, como exemplificado na figura 30^[12].

No que diz respeito ao ensaio de resistência à oxidação (μ HAST), este é efectuado para avaliar a fiabilidade dum componente ou dos intermetálicos em condições extremas de humidade e temperatura, sem nenhuma tensão eléctrica aplicada de forma a impedir que surjam potenciais mecanismos de falha causados pela tensão eléctrica, tal como a corrosão galvânica. Este ensaio acelera a penetração de humidade dentro do componente. Os componentes são aquecidos a uma temperatura de 130°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) e à uma humidade relativa de 85% ($\pm 5\%$) durante 264 horas (μ HAST264) ^[13].

O ensaio de armazenamento a alta temperatura (HTS) é efectuado para acelerar mecanismos de falhas activados termicamente, tal como o mecanismo de difusão. De facto, este ensaio providencia o crescimento dos intermetálicos na interface ouro/alumínio e o problema que acarreta este crescimento^[14]: a formação de poros *Kirkendall*. No ensaio de armazenamento a alta temperatura, a amostra (seja componente ou substrato com fio de ouro) é colocada numa estufa à temperatura de 180°C ($+10^\circ\text{C}$) durante 240 (HTS240) e 480 horas (HTS480) ^[15].

3.3. CrITÉRIOS para validação dos fios

É importante salientar que a validação da utilização dos diferentes fios testados é efectuada em duas etapas.

A validação do processo de ligação em substrato, sem seguir o processo produtivo normal. Neste caso os testes são realizados após a soldadura, após a simulação dos processos de *mold* e de *ball attach* e após o armazenamento a altas temperaturas.

A validação do funcionamento eléctrico dos fios testados. Estes testes são efectuados ao longo de todo o processo produtivo, inclusive em *Burn In* e em teste U4 e U2. Os componentes que passam estes últimos testes também são submetidos aos ensaios de fiabilidade.

3.3.1. Critérios para validação do processo *wirebond*

A tabela 3 apresenta os testes realizados para a validação do processo de ligação em cada passo produtivo.

Tabela 3- Etapas produtivas e testes efectuados para a validação do processo *wirebond*

Fluxo do substrato	Testes efectuados
1 - <i>Diebond</i>	
2 - <i>Wirebond</i>	Ensaio de tracção Dimensões da bola da 1ª ligação Área de cobertura de intermetálicos Detecção de fissuras no <i>chip</i> Observação do canal de ligação e da 2ª ligação
3 - Cura de <i>mold</i> (2 horas a 200°C)	
4 - Ciclo térmico de <i>ball-attach</i> (1 minuto a 240°C) (HTS0)	Ensaio de tracção Ensaio de corte Área de cobertura de intermetálicos Observação da secção longitudinal da ligação
5 - Armazenamento a 180°C durante 240 horas (HTS240)	Ensaio de tracção Ensaio de corte Observação da secção longitudinal da ligação
6 - Armazenamento a 180°C durante 480 horas (HTS480)	Ensaio de tracção Ensaio de corte Observação da secção longitudinal da ligação

É de salientar que o teste de corte não foi efectuado logo após *wirebond* devido à altura da bola ter sido reduzida por razões externas a este trabalho, e, por isso, não permitir a realização do ensaio. Entretanto, a altura da agulha

foi alterada e o teste foi efectuado devidamente, mas só a partir do ciclo térmico de *ball-attach*.

De forma a avaliar o impacto das alterações do fio: fornecedor e diâmetro, no processo de *wirebond*, foram efectuados os testes de controlo de processo como ilustra a tabela 4. Nesta tabela e nas 4 tabelas seguintes, são apresentados os testes, as amostragens e os critérios mínimos para a posterior validação.

Tabela 4- Testes realizados após *wirebond*

Testes		Amostragens	Critérios
Testes de controlo de processo	Ensaio de tracção	40 fios/unidade x 5 unidades	>3gf e 0 bolas de 1ª ligação levantada
	Area de cobertura dos intermetálicos	5 bolas/unidade x 5 unidades	>65%
	Altura da bola da 1ª ligação	10 bolas/unidade x 5 unidades	6-15 µm
	Diâmetro da bola da 1ª ligação	10 bolas/unidade x 5 unidades	42-52 µm
	Detecção de fissuras no chip	5 pads x 1 unidade	0 micro-fissuras
Inspeção no SEM das 2 ligações	Imagem SEM da 1ª ligação	5 bolas/unidade x 3 unidades	0 anomalias nas ligações e no arco
	Imagem SEM da 2ª ligação	5 bolas/unidade x 3 unidades	
	Imagem SEM da forma do arco	3 unidades	

Os testes, apresentados na tabela 5, são efectuados para avaliar o comportamento do fio após os dois processos envolvendo altas temperaturas (cura de *mold* e ciclo térmico de brasagem de *ball-attach*), testando a resistência do fio à tracção e ao corte assim como controlar a cobertura de intermetálicos e avaliar o comportamento dos intermetálicos pela observação da secção transversal da bola da 1ª ligação.

Após estes testes, os substratos são submetidos ao ensaio de armazenamento a alta temperatura (HTS) a 180°C durante 240 e 480 horas e são novamente testados de acordo com a tabela 6.

Tabela 5- Testes realizados após ciclo térmico de *mold* e *ball attach*

Testes	Amostragens	Critérios
Ensaio de tracção	40 fios/unidade 5 unidades	>3gf e 0 bolas de 1ª ligação levantada
Ensaio de corte	10 fios/unidade 5 unidades	>7gf
Fracção de área de intermetálicos	5 bolas/unidade 5 unidades	>65%
Observação da secção longitudinal	4 bolas/unidade 1 unidade	O somatório dos comprimentos sem poros $\geq 15\mu\text{m}$

Tabela 6- Testes realizados após HTS para 240 e 480 horas

Testes	Amostragens	Critérios
HTS240:	Mesma que tabela 5	
Ensaio de tracção		>3gf e 0 bolas de 1ª ligação levantada
Ensaio de corte		>7gf
Observação da secção longitudinal		O somatório dos comprimentos sem poros $\geq 10\mu\text{m}$
HTS480:		
Ensaio de tracção		>3gf e 0 bolas de 1ª ligação levantada
Ensaio de corte		>7gf
Observação da secção longitudinal		O somatório dos comprimentos sem poros $\geq 10\mu\text{m}$

3.3.2. Critérios para validação do funcionamento eléctrico do fio

Ao contrário da validação do processo de *wirebond* na validação do funcionamento do fio de ouro, os testes são realizados ao longo de todo o processo produtivo: em substrato até o processo de *singulation* e em componente em *Burn In* e testes eléctricos U4 e U2. Os componentes que passarem todos estes testes serão submetidos aos ensaios de fiabilidade. Após os ensaios de fiabilidade, os componentes são testados novamente em U4 e U2 de forma a avaliar o impacto do ensaio de fiabilidade¹.

¹ As falhas (componentes que não passaram os testes) podem ter dois tipos de causa: anomalia no *chip* ou anomalias relacionadas com os processos de montagem onde está incluído o fio de ouro.

Após *wirebond* e após *mold* são efectuados os testes apresentados na tabela 7. A realização da radiografia destina-se a observar a forma dos fios de ligação após a injeção do polímero termoendurecível.

Tabela 7- Testes realizados após os processos de *wirebond* e de *mold*

Étapas	Testes	Amostragens	Critérios
Logo após Wirebond	Ensaio de tracção	10 bolas/ unidade 1 unidade	>3gf e 0 bolas de 1ª ligação levantada
	Altura da bola da 1ª ligação	5 bolas/ unidade 1 unidade	6-15 µm
	Diâmetro da bola da 1ª ligação	5 bolas/ unidade 1 unidade	42-52 µm
Logo após molde	Inspecção Raio X	6 substratos	0 fios deitados

A alteração de fio poderá influenciar o comportamento do componente em *Burn In* e em teste U4 e U2. Portanto é necessário analisar os resultados em *Burn In* e em U4 e U2. Tal como ilustrado na figura 31, os componentes que passaram *Burn In* e os testes eléctricos, irão efectuar PRECON e ensaios de fiabilidade: TC500, HTS 240 e 480 horas e µHAST 240 horas. Todos os componentes após os ensaios de fiabilidade voltam a ser testados em U4 e U2, é também efectuada uma inspecção por corte longitudinal de forma a avaliar a integridade da 1ª ligação. O critério de validação para os testes eléctricos e para a observação do corte longitudinal estão apresentados na tabela 8.

Tabela 8- Critérios de aceitação após ensaios de fiabilidade

Testes eléctricos U4 e U2	0 falhas relacionadas com o fio
Corte longitudinal da bola	O somatório dos comprimentos sem poros $\geq 10\mu\text{m}$
Resistência à tracção após HTS480 (140 fios)	>3 gf e 0 fios levantados

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A apresentação dos resultados experimentais será dividida em duas partes.

Na primeira parte serão apresentados os resultados dos testes realizados com as soldaduras efectuadas com o fio GFC com diâmetro de 23,5 μm , os resultados serão comparados com os do fio actualmente utilizado na produção, o fio HD5 com o mesmo diâmetro (23,5 μm). O objectivo desta comparação é avaliar o impacto da utilização de fios de diferentes fornecedores na qualidade da ligação. Os fornecedores não fornecem informações sobre as propriedades ou composição química do fio, e neste trabalho essas características não foram analisadas. Fios de diferentes fornecedores podem ser fios de diferentes composição e/ou com diferentes propriedades.

Na segunda parte deste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com o fio HA5 com o diâmetro de 17,5 μm . O comportamento deste fio será comparado com o do fio, ainda em fase de qualificação na empresa, HA5 com diâmetro 19,5 μm , estudando neste caso a influência da redução do diâmetro na qualidade da ligação. Os resultados experimentais dos testes realizados com o fio HA5 19,5 foram recolhidos durante a fase de qualificação do fio; todos os outros resultados inclusive os do fio actualmente utilizado na produção foram obtidos no âmbito deste trabalho. É de salientar que estas comparações serão somente efectuadas para a validação do processo *wirebond*.

Nestas experiências, de forma a garantir que o único factor em avaliação seja o fornecedor e/ou a variação do diâmetro do fio, foram utilizados: o mesmo equipamento de *wirebond*, o mesmo produto e o mesmo fornecedor de *chip*. É importante salientar que a área de contacto entre o *pad* e o fio não foi alterada.

4.1. Validação do fio GFC com diâmetro 23,5 µm

4.1.1. Validação dos parâmetros de *wirebond*

Os parâmetros utilizados, para o processamento das ligações com fios de composição GFC e HD5 com diâmetros de 23,5 µm.

As observações em MEV do *pad* do *chip* de silício permitiram verificar que nenhuma das ligações testadas apresentavam fissuras no *chip*.

As imagens MEV do canal de ligação confirmaram que a mudança de fornecedor não teve nenhum impacto na geometria do arco, nem no aspecto da 1ª ou da 2ª ligação.

Os diâmetros da bola da 1ª ligação, de 25 fios analisados, permitem constatar que os valores, para os dois fios, estão dentro dos limites de especificação (ver figura 32). No entanto, existe uma ligeira diferença de 3 µm entre a média do fio GFC (46,1 µm) e do fio HD5 (49,1 µm).

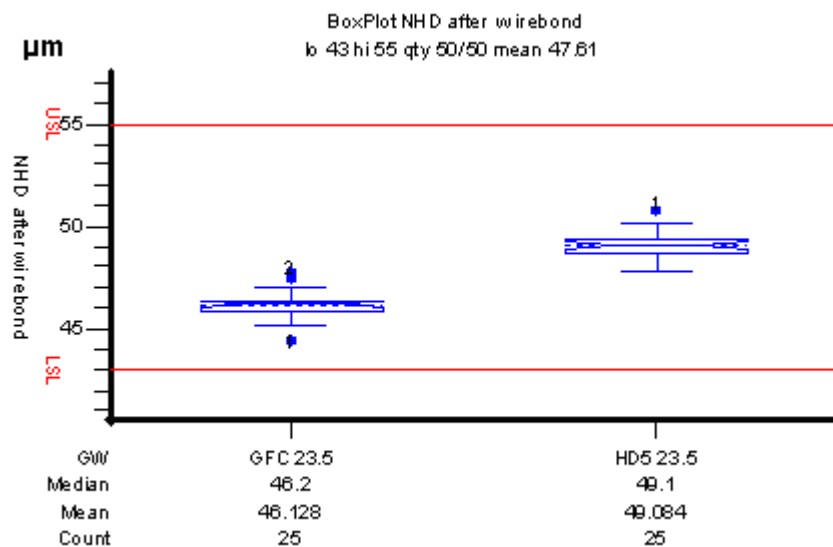


Figura 32 - Comparação do diâmetro da bola da 1ª ligação entre o fio HD5 e GFC com 23,5 µm de diâmetro

A figura 33 apresenta um gráfico com os valores da altura da bola das mesmas ligações e permite verificar que, em ambos os casos, a altura média é de 9,9 µm.

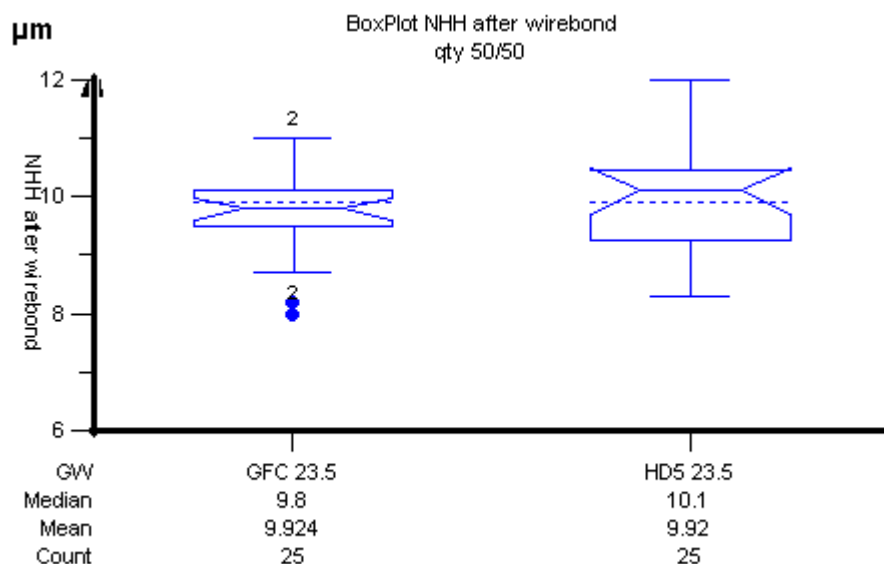


Figura 33 - Comparação da altura da bola da 1ª ligação entre os fios HD5 e GFC 23,5 µm

Como se pode ver na tabela 9, a percentagem da área da ligação coberta com compostos intermetálicos de ambos os fios apresenta valores acima dos 65%, com uma média de 82% para o fio GFC e de 78% para o fio HD5. É de salientar que após a cura de *mold* e o ciclo térmico de brasagem de *ball-attach*, a percentagem da cobertura de compostos intermetálicos não é alterada.

Tabela 9- Dados de coberturas de intermetálicos após *wirebond* e ciclo térmico de *ball-attach*

Após <i>wirebond</i>	Fio 23,5 GFC	Fio 23,5 HD5
Pior valor	76%	73%
Média	82%	78%
Melhor valor	87%	84%
Após o ciclo térmico de <i>ball-attach</i>	Fio 23,5 GFC	Fio 23,5 HD5
Pior valor	79%	73%
Média	83%	78%
Melhor valor	87%	85%

As figuras 34 a) e b) apresentam as imagens das secções da 1ª ligação em que se observam a maior quantidade de poros *Kirkendall*. Através destas figuras, podemos comprovar que, antes do armazenamento dos substratos a 180°C (HTS 0 horas), as secções longitudinais de ambos os fios não apresentam poros *Kirkendall*². No entanto, com a exposição a 180°C durante 240 e 480 horas formam-se poros, mas o somatório dos comprimentos sem poros, na linha dos intermetálicos, é sempre superior a 10 µm. O pior caso foi o do fio GFC que após 240 horas apresenta um somatório de comprimentos sem poros de 16 µm. De facto nas ligações com o fio GFC formaram-se mais poros que no caso do fio HD5, no entanto a especificação foi cumprida.

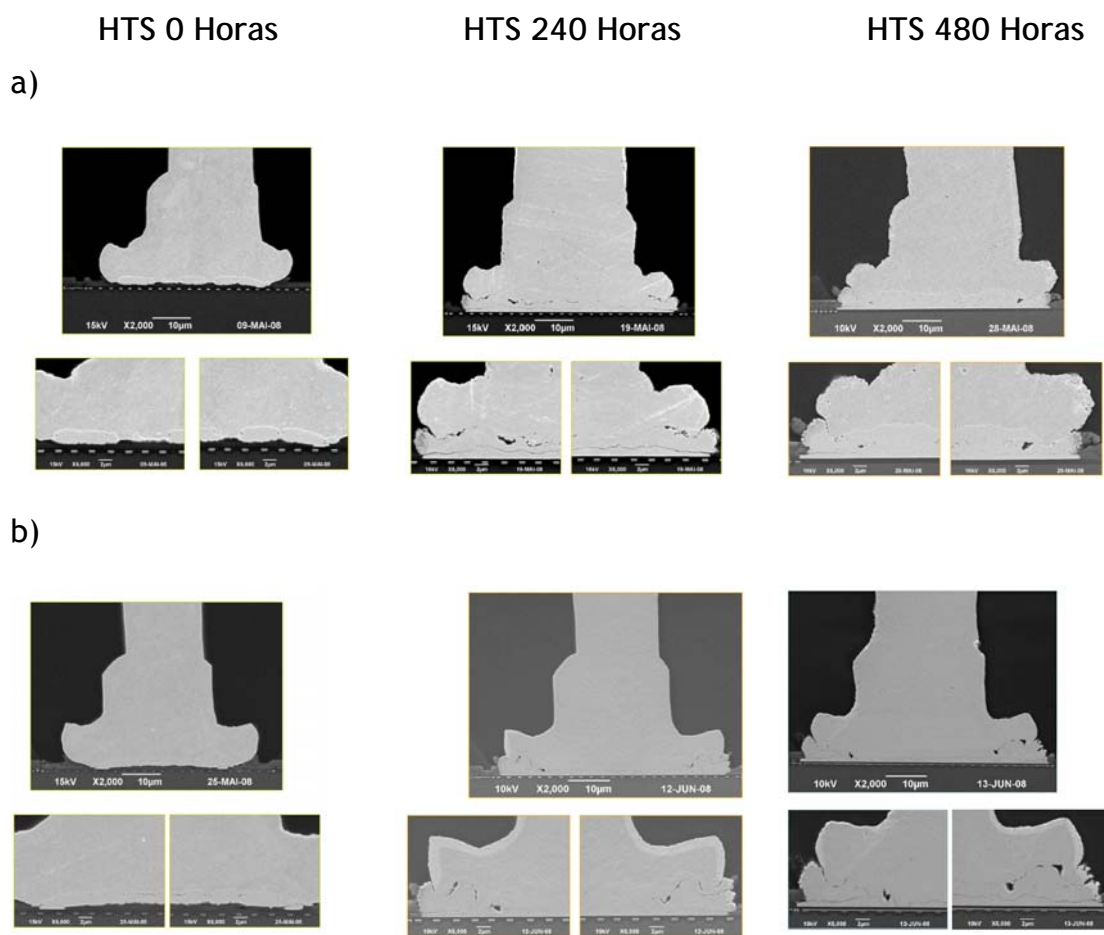


Figura 34 - Imagens MEV das secções longitudinais da 1ª ligação antes do ensaio do armazenamento à alta temperatura (HTS0) e após 240 e 480 horas: a) do fio GFC 23,5; b) do fio HD5 23,5

² É de salientar que as medições dos comprimentos sem poros, na linha dos intermetálicos, não são efectuadas para os casos nos quais os poros são pequenos e não existem dúvidas no que diz respeito aos cumprimentos dos critérios

Os valores da resistência à tracção, calculada utilizando a força média de rotura (50 valores) e a secção do fio (23,5 μm), estão representados no gráfico da figura 35. Os valores médios, máximos e mínimos das forças de rotura podem ser consultados no gráfico do anexo A a). A resistência à tracção após *wirebond* e HTS aumenta ao longo do tempo de exposição à 180°C, aumentando de 213 MPa após *wirebond* para 220 MPa após HTS a 480 horas, para o fio GFC e para 222 MPa para o fio HD5. É importante salientar que todas as ligações partiram pelo fio e que não houve nenhuma ocorrência de bolas levantadas, portanto ambos os fios passaram os critérios.

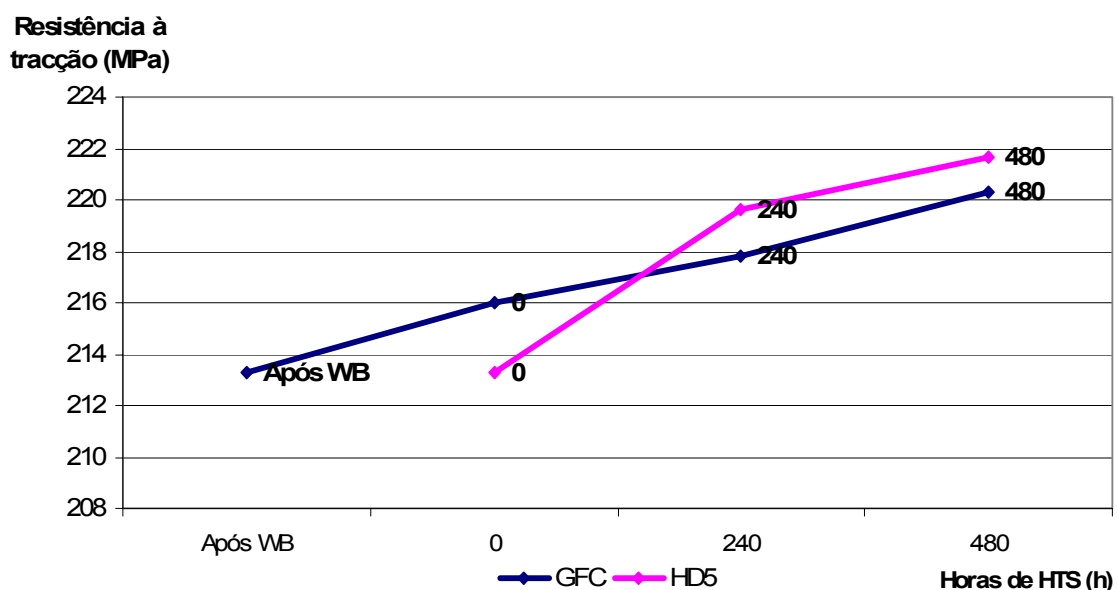


Figura 35 - Comparação da resistência à tracção entre o fio GFC e HD5 durante HTS

Os resultados do teste de corte da bola da 1ª ligação estão apresentados no gráfico do anexo A b). Tal como no caso dos resultados do ensaio de tracção, a média da força de rotura foi utilizada para calcular a resistência ao corte da 1ª ligação. Neste caso, a secção foi calculada utilizando a média dos diâmetros da bola de ligação. O gráfico da figura 36 apresenta os valores da resistência ao corte dos dois fios e podemos constatar que a resistência diminui com a exposição a alta temperatura. Os dois fios apresentam o mesmo comportamento mas, no caso do fio GFC a diminuição da resistência é mais acentuada que a do fio HD5: após 240 horas de HTS, a resistência ao corte do fio HD5 teve uma diminuição de 6% contra uma diminuição de 18% para o fio

GFC; após 480 horas a resistência do fio HD5 diminui 6,5% e a do fio GFC cerca de 25%.

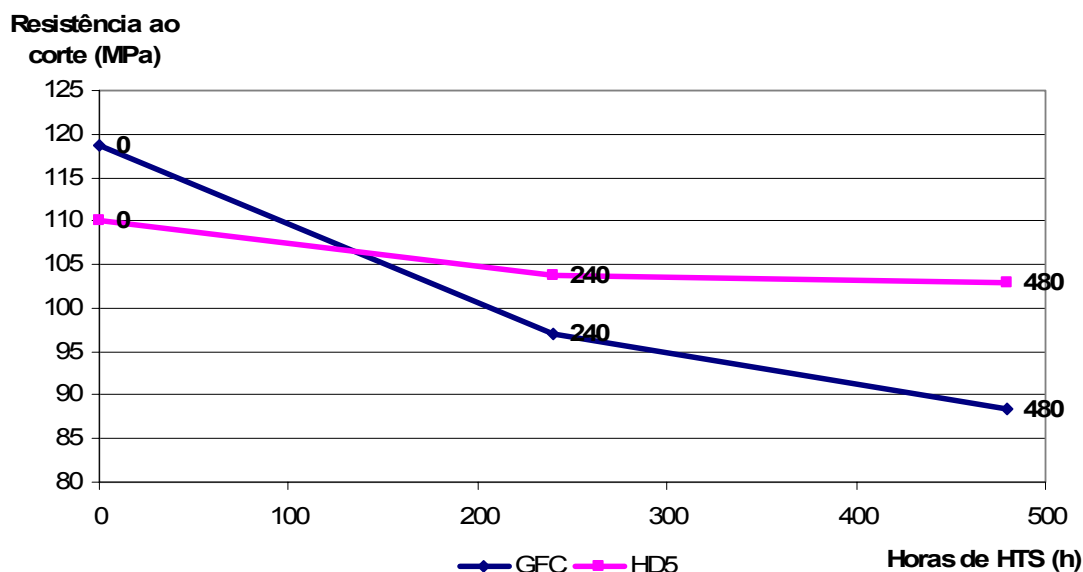


Figura 36 - Evolução da resistência ao corte do fio GFC e HD5 durante HTS (180°C)

Pela observação das secções longitudinais, podemos salientar que nas ligações de ambos os fios ocorreu a formação de poros após exposição a 180°C durante 240 e 480 horas. Os poros aparecem sempre nas extremidades da bola da 1ª ligação e o somatório dos comprimentos sem poros é sempre superior a 10 µm, todas as ligações cumprem o critério de validação.

No entanto, após 240 horas o fio GFC apresenta mais poros que o HD5. O fio GFC também apresenta uma maior cobertura de intermetálicos que, de acordo com a bibliografia, devia garantir um crescimento mais homogêneo dos compostos intermetálicos e uma menor quantidade de poros. A discrepância entre o comportamento do fio GFC e o referido pela bibliografia pode ser provocado por diferentes composições do fio; composições que acentuem as diferenças de coeficiente de difusão do ouro e do alumínio promovem a formação de poros. Uma vez que, neste trabalho, não foram determinadas composições dos fios nem o fornecedor disponibiliza esses dados, esta justificação é apenas uma hipótese que merece esclarecimento em trabalho posterior.

O fio GFC tem uma maior cobertura de compostos intermetálicos após *wirebond* que o fio HD5, o que lhe confere uma maior resistência ao corte

antes de HTS. É de realçar que a resistência ao corte, de ambos os fios, diminui durante a exposição a 180°C, tal como referido na bibliografia. No entanto ao longo da exposição à 180°C, a resistência do fio GFC diminui significativamente, cerca de 25% contra 6,5% para o fio HD5. Este comportamento está relacionado com a formação de poros *Kirkendall* que diminuem a área efectiva de ligação. Podemos concluir que a ligação efectuada com o fio GFC de 23,5 µm de diâmetro não é tão resistente ao corte como a do fio HD5 com o mesmo diâmetro, após exposição à 180°C.

Com base nos resultados do gráfico da figura 35, podemos concluir que a resistência à tracção, de ambos os fios, aumenta com a exposição a 180°C. Estes resultados vão de encontro ao referido na bibliografia, na qual foi salientado que o aumento da resistência a tracção pode ser causado por um relaxamento das tensões internas provenientes do processo *wirebond*. É de salientar que todas as fracturas ocorreram na zona menos resistente do fio que, segundo a literatura e os resultados do presente trabalho, corresponde à zona afectada pelo calor. Tal como constatado na evolução da resistência ao corte, o fio GFC apresenta uma resistência à tracção superior à do fio HD5, antes do armazenamento à 180°C. Durante o armazenamento à 180°C a resistência à tracção do fio HD5 aumenta e ultrapassa a do fio GFC em 2 MPa.

Com base nos resultados dos testes efectuados, podemos concluir que a soldadura do fio GFC tem melhores propriedades que o fio HD5. No entanto, a ligação do fio GFC degrada-se mais acentuadamente durante a exposição a altas temperaturas apresenta mais poros *Kirkendall*; e em consequência a resistência ao corte diminui drasticamente (25%) e o aumento da resistência à tracção é inferior ao do fio HD5.

Todos os resultados dos testes cumprem a especificação e, em consequência os parâmetros de *wirebond* são validados. A introdução deste novo fio não teve impacto negativo no processo de *wirebond*.

4.1.2. Validação do funcionamento do fio GFC 23,5 μm

Tal como salientado no início do capítulo 4., as ligações seguem o processo produtivo normal e ao longo dos processos, são efectuados todos os controlos e inspecções às ligações de forma a garantir o controlo e a qualidade de cada processo. A tabela 10 apresenta as médias dos valores dos testes de controlo após *wirebond*.

Tabela 10- Valores dos testes de controlo após *wirebond*

Teste de tracção (gf)	Diâmetro da bola (μm)	Altura da bola (μm)
9,5	46,0	9,9

O resultado da radiografia efectuada após o processo de *mold* não revelou qualquer defeito de fios deitados.

Tal como explicado no fluxograma da figura 29, após o processo de montagem, os componentes foram sujeitos ao teste de *Burn In* e testes eléctricos. A tabela 11 mostra os resultados e as quantidades que foram testadas.

Tabela 11- Resultados do teste de Burn In e testes eléctricos

Testes	Burn In	U4	U2
Número de componentes testados	1869	1667	1640
Resultados dos testes	A percentagem de componentes que falharam os testes está dentro do valor aceitável de produção		

Antes de qualquer ensaio de fiabilidade, foram efectuados cortes longitudinais a quatro bolas da 1ª ligação e em todos eles os critérios de validação foram cumpridos. Na figura 37, pode-se observar, das quatro secções, a que apresenta mais poros. Nesta figura constamos que a camada de compostos intermetálicos é uniforme, no entanto alguns poros *Kirkendall* formaram-se, tal como indicado pela seta na figura 37.

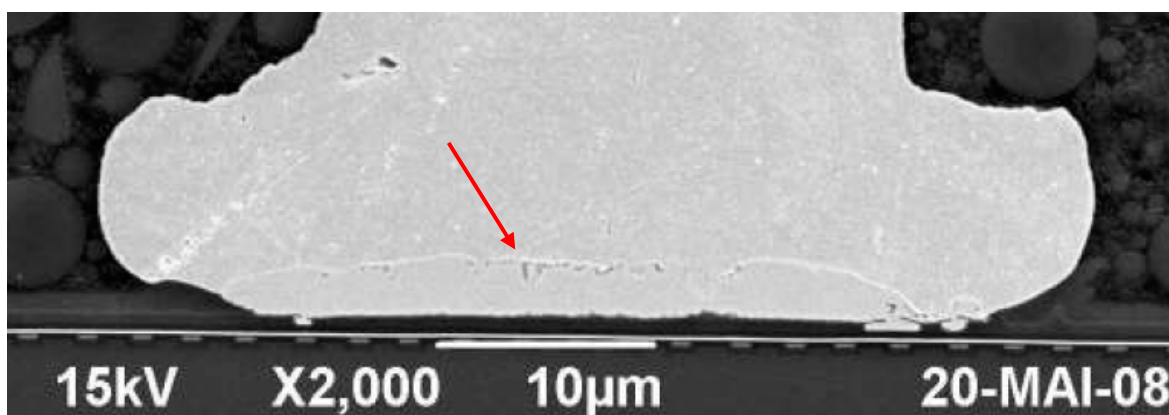


Figura 37 - Secção longitudinal da bola da 1ª ligação com pequenos poros na linha dos intermetálicos antes de PRECON.

A observação das secções longitudinais de quatro bolas após o teste PRECON e HTS240, revelaram que 50% das bolas cumprem o critério de 10 µm, sem porosidades (17,0 e 20 µm), e 50% falham o critério com 7,2 (ver figura 38) e 9,5 µm.

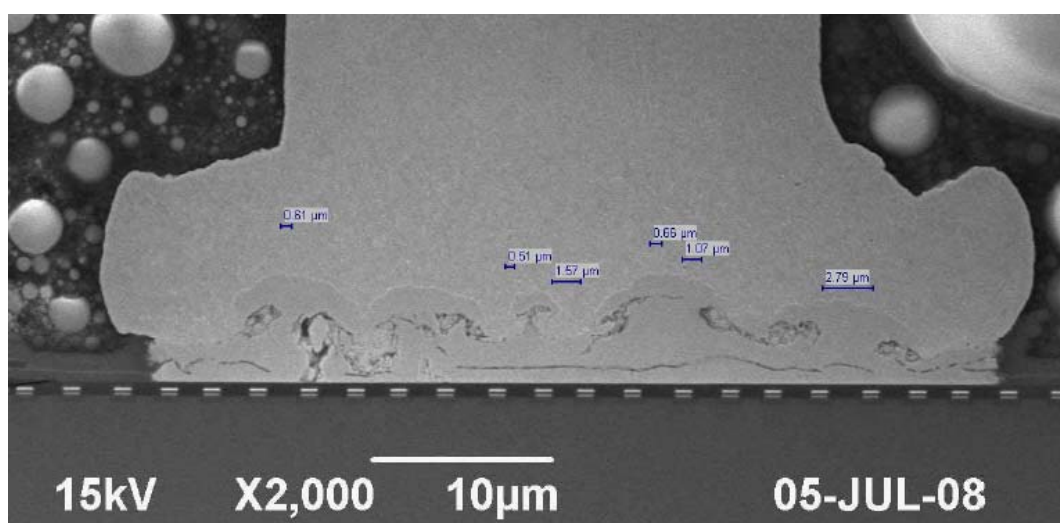


Figura 38 - Secção longitudinal do fio que falhou o critério após PRECON e HTS240: medições dos comprimentos de linhas sem poros indicadas na figura ($\Sigma=7,2$ µm)

Após PRECON e HTS480, três das quatro secções observadas, ultrapassaram ligeiramente o critério com 10,5; 10,6 e 11µm e uma não atingiu o critério sendo o valor medido de 4,8 µm.

A tabela 12 apresenta os valores da força de rotura obtidos após PRECON e HTS480. É de salientar que 14% dos fios testados fracturaram pela zona dos intermetálicos, ou seja a bola da 1ª ligação foi arrancada pelo ensaio.

Tabela 12- Resultados do ensaio de tracção após PRECON e HTS480 de 140 ligações

Valor máximo (gf)	Valor médio (gf)	Valor mínimo (gf)	Quantidade de fios e tipo de fractura	%
11,1	8,7	3,2	Todos os ensaios efectuados (140)	100
11,1	9,1	8,2	Fractura pelo fio (121)	86
8,2	6,2	3,2	Fractura pelos intermetálicos (19)	14

A figura 39 mostra a secção transversal do fio com mais poros após PRECON e ensaio de fadiga, TC500. A camada de intermetálicos não é uniforme e ocorreu a formação de poros na linha dos intermetálicos. No entanto, não comprometeu o critério de pelo menos 10 µm de comprimentos na linha de intermetálicos sem poros. É de salientar que não foram observadas fissuras ao longo da ligação.

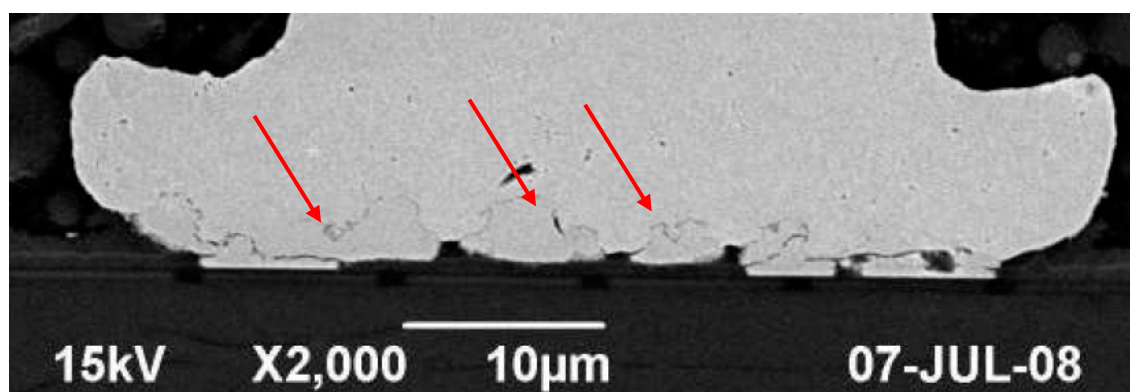


Figura 39 - Secção transversal da bola da 1ª ligação após PRECON e TC500: existência de pequenos poros e nenhuma fissura visualizada

O teste de resistência à oxidação durante 264 horas revelou presença de pequenos poros que não comprometeram o critério de validação. E de salientar que a camada de intermetálicos é uniforme. O somatório dos comprimentos sem poros é claramente superior a 10 µm.

É importante referir que os resultados dos testes eléctricos, após os ensaios de fiabilidade, não revelaram falhas relacionadas com a ligação do fio de ouro, foram todas provocadas por problemas de fabrico do *chip*.

Podemos salientar que os valores dos parâmetros controlados após *wirebond* são muito próximos dos obtidos durante a validação do processo *wirebond* (em que somente se simularam os processos de cura de *mold* e *ball attach*): uma diferença de 0,1 gf para a força de tracção; alturas de bola iguais e 0,1 µm de diferença para o diâmetro da bola.

A percentagem de componentes que passaram o teste de *Burn In* indica que a substituição do fio de ouro não causou impacto negativo na fiabilidade do produto, pois este valor está dentro do valor aceitável de produção. É de salientar que as falhas não foram relacionados com o fio nem com o processo de montagem. O mesmo acontece com o comportamento dos componentes nos testes eléctricos, as falhas não foram relacionadas com a alteração do fio nem com problemas de processo, são sempre originadas por defeito do *chip*.

Após PRECON e HTS 240, a ligação com o fio GFC apresenta valores (7,2 e 9,5 µm) de comprimento sem poros inferiores ao critério (10 µm). De facto com base nestes resultados, o fio GFC não cumpre com o critério de validação. Naturalmente as ligações que sofreram os testes de PRECON e HTS 480 horas, apresentam piores resultados e podemos concluir que o armazenamento durante 480 horas à 180°C precedido do teste PRECON foram as condições com mais impacto na integridade da ligação.

A resistência à tracção, após PRECON e 480 horas de HTS, sofreu uma diminuição de 8,4% (a força de rotura diminui de 9,5 gf após *wirebond* para 8,7 gf). A principal causa desta diminuição é a ocorrência de bolas levantadas (14% com uma força de rotura média de 6,2 gf, inferior em 34,7% à das ligações testadas após *wirebond*); as restantes ligações (86%) foram pouco afectadas pelos testes de PRECON e HTS, a resistência à tracção média diminuiu somente de 4,2% (9,1 gf). A ocorrência de bolas levantadas está provavelmente ligada à formação massiva de poros na zona de ligação, a diminuição da área efectiva de ligação transforma esta zona na zona menos resistente da ligação (que anteriormente era a zona afectada pelo calor). No entanto, o contacto eléctrico é sempre mantido uma vez que não ocorreram falhas eléctricas. Estes resultados estão de acordo com a bibliografia, a presença de poros pode não levar a falhas eléctricas.

No que diz respeito ao teste de fadiga, os resultados após PRECON e TC500 revelaram a existência de alguns poros, não comprometendo a integridade da linha dos intermetálicos. As ligações resistiram ao teste de fadiga e não foram observados defeitos nem ocorreram falhas eléctricas após este teste.

O teste de resistência à oxidação revelou que a ligação apresentava pequenos poros *Kirkendall* e uma camada de compostos intermetálicos uniforme ao longo da ligação. De facto neste teste, não ocorreu nenhuma anomalia relacionada com a elevada humidade relativa da atmosfera, a formação dos poros está relacionada com a temperatura utilizada.

Podemos concluir que o armazenamento a alta temperatura, precedido do teste PRECON, foi o teste com maior impacto na integridade da ligação. A formação massiva de poros no fio GFC, durante este teste, foi responsável pela não validação do funcionamento do fio. Como consequência desta formação massiva de poros ocorrem falhas de ligação por levantamento de bolas e a redução da resistência mecânica da ligação. Tendo sido mantidos constantes os parâmetros do processo de *wirebond* e o diâmetro do fio, a não qualificação deste novo fio tem de ser atribuída a diferenças de composição que afectam negativamente os coeficientes de difusão do alumínio e do ouro, acentuando as suas diferenças.

4.2. Validação do fio HA5 de diâmetro 17,5 μm

4.2.1. Validação dos parâmetros de *wirebond*

Devido a diferença de diâmetro entre os dois fios, foi necessário alterar os parâmetros de processo em *wirebond*. Para tal, foram ajustados 3 parâmetros que têm impacto na formação da FAB no passo a) do processo de *wirebond*. Os parâmetros alterados, foram o comprimento da cauda, o tempo e a intensidade da descarga eléctrica. De facto, como o objectivo era manter o mesmo diâmetro da FAB, de forma a obtermos a mesma área de ligação com o *pad*, foi necessário aumentar em 20 μm o comprimento da cauda para o fio de diâmetro 17,5 μm . O tempo de descarga eléctrica foi diminuída de 5 ms (de 0,27ms para 0,22) e a intensidade aumentada de 2mA (de 34,5 para 36,5 mA).

A tabela 13 resume os valores de comprimento da cauda e o produto entre a intensidade e tempo da descarga eléctrica no processamento dos três fios

usados durante este trabalho. Para manter o diâmetro da FAB em fios de menor diâmetro é necessário aumentar o comprimento da cauda e diminuir a descarga eléctrica (EFO) para a formação da bola.

Tabela 13- Impacto da redução do diâmetro do fio na descarga eléctrica no processo de wirebond

Fios	HD5 23,5	HA5 19,5	HA5 17,5
Comprimento da cauda (μm)	200	230	250
Descarga EFO (mA x ms)	12,7	9,3	8,0

No que diz respeito aos capilares, para o processamento do fio HA5 17,5 μm , foi utilizado o mesmo que no processamento do fio com 19,5 μm de diâmetro. Embora tenha sido possível utilizar este capilar no decorrer do presente trabalho, para a qualificação do fio HA5 de 17,5 μm de diâmetro é necessário alterar o diâmetro do furo do capilar de forma a reduzir a folga para a folga optimizada (aproximadamente + 3 μm que o diâmetro do fio).

Os resultados do teste “*cratering*”, para os fios HA5, não revelaram nenhuma fissura visível no *pad* do *chip*. De facto, como não houve alteração nos parâmetros utilizados para a formação da 1ª ligação não era de esperar obter resultados diferentes.

As imagens MEV mostraram que ambos os fios têm a mesma forma. Não foram observados desvios relativamente à forma do arco do fio da 1ª para 2ª ligação.

Os valores de NHD medidos para cada fio estão apresentados no gráfico da figura 40. Podemos observar que os valores estão dentro dos limites de especificação (entre 43 e 55 μm) e que as médias dos dois fios são muito próximas: 47,23 μm para o fio de 19,5 μm e de 47,24 μm para o fio de 17,5 μm . Os fios têm áreas de contacto com o *pad* de alumínio semelhantes.

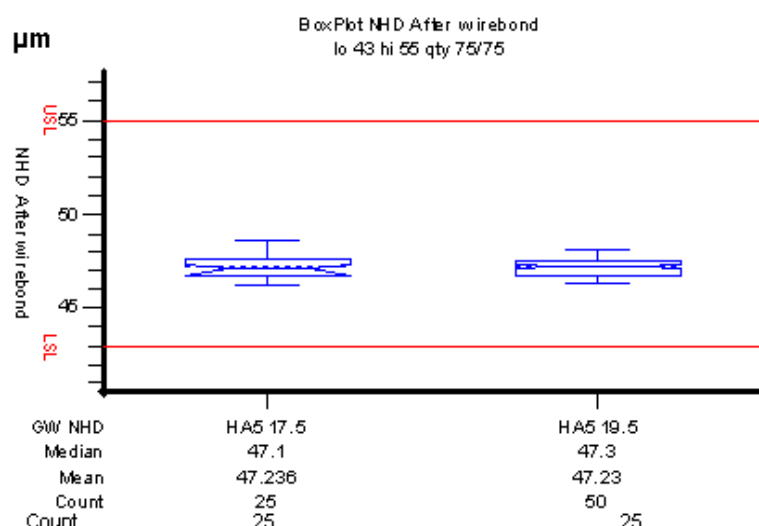


Figura 40 - Comparação do diâmetro da bola entre os fios HA5 19,5 e 17,5

Como podemos observar no gráfico da figura 41, as médias da altura da bola são ligeiramente diferentes para os dois fios: 7.9 μm para o fio 19,5 μm e de 9,4 μm para o fio de 17,5 μm . Esta diferença está relacionada com a variação do processo de soldadura.

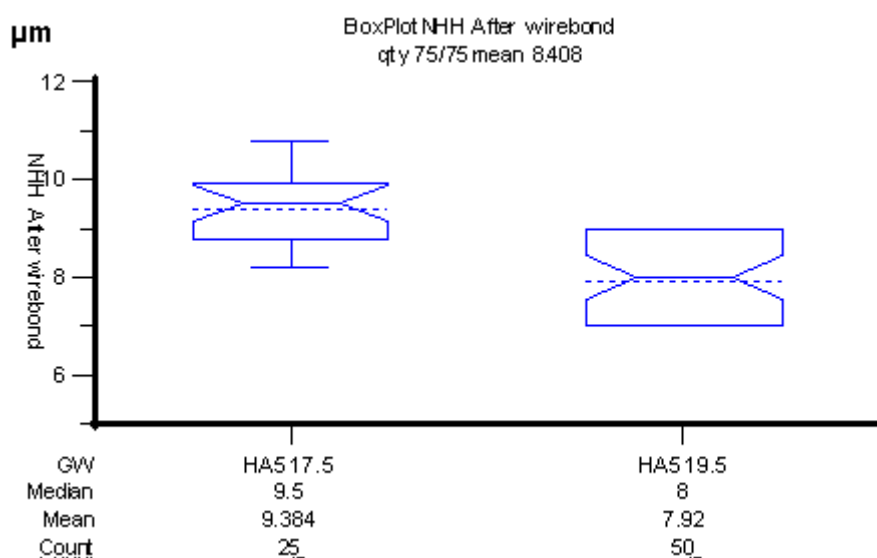


Figura 41 - Comparação da altura da bola entre os fios HA5 19,5 e 17,5 μm

Relativamente à cobertura dos intermetálicos após *wirebond*, como podemos observar pelos resultados apresentados na tabela 14, os fios apresentam resultados acima de 65%. No entanto, podemos constatar que o fio de 17,5 μm apresenta uma taxa de cobertura média inferior em 7% que à do fio de 19,5 μm .

Após a cura de *mold* e o ciclo térmico de brasagem de *ball-attach*, o fio de 17,5 µm continua com menor taxa de cobertura de intermetálicos que o fio de 19,5 µm em 7%.

Tabela 14- Dados de coberturas de intermetálicos após *wirebond* e ciclo térmico de *ball-attach*

Após <i>wirebond</i>	Fio HA5 17,5 µm	Fio HA5 19,5 µm
Pior valor	75%	78%
Média	80%	87%
Melhor valor	85%	92%
Após o ciclo térmico de <i>ball-attach</i>	Fio HA5 17,5 µm	Fio HA5 19,5 µm
Pior valor	72%	79%
Média	80%	87%
Melhor valor	85%	91%

Na figura 42 estão ilustradas as imagens MEV das secções dos fios de 19,5 e 17,5 µm que apresentam as maiores quantidades de poros, após 240 e 480 horas de HTS. As imagens MEV antes do armazenamento a alta temperatura não foram apresentadas porque não foram observadas porosidades. Após HTS, para ambos os fios, o somatório dos comprimentos sem poros na linha dos intermetálicos é sempre superior a 10µm. É de salientar que o fio de 17,5 µm apresenta piores resultados que o fio de 19,5 µm, o somatório dos comprimentos sem poros é de 14 µm contra 26 µm para o fio de 19,5 µm.

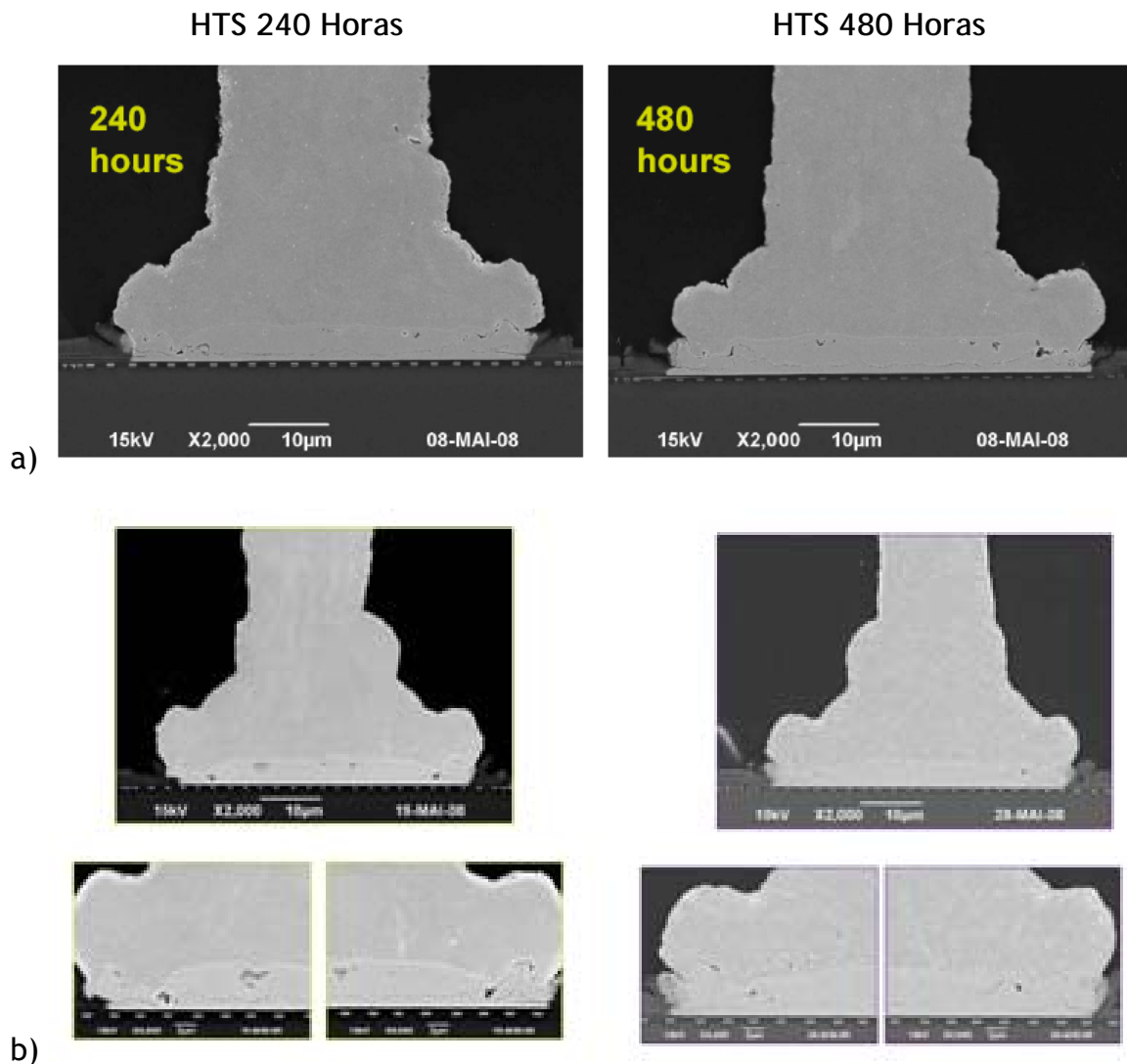


Figura 42 - Imagens MEV das secções da 1ª ligação antes e após 240 e 480 horas de HTS: a) para o fio HA5 19,5; b) para o fio HA5 17,5

No gráfico da figura 43 estão apresentadas as evoluções das resistências à tracção dos fios HA5 17,5 e de 19,5 μm , desde *wirebond* até 480 horas de HTS. Este gráfico foi elaborado com base nas forças de tracção médias do gráfico do anexo B. É notável que as resistências à tracção aumentem com a permanência a 180°C tal como já constatado para os fios de 23,5 μm . As fracturas ocorreram todas pelo fio, não havendo bolas levantadas após o ensaio.

Tal como podemos observar no gráfico da figura 43, a resistência à tracção do fio 19,5 μm é sempre mais elevada que a do fio de 17,5 μm , sendo a resistência à tracção média de 224 MPa (6,8 gf), após *wirebond*, para o fio 19,5 contra uma resistência média de 202 MPa (5,0 gf) para o fio de 17,5.

Constata-se que entre *wirebond* e após a cura de *mold* e simulação do processo de brasagem de *ball-attach* (HTS0), a resistência diminuiu aproximadamente de 4% (10 MPa) para o fio HA5 17,5 μm , ao contrário, para o fio de 19,5 μm , a resistência não sofreu um aumento significativo.

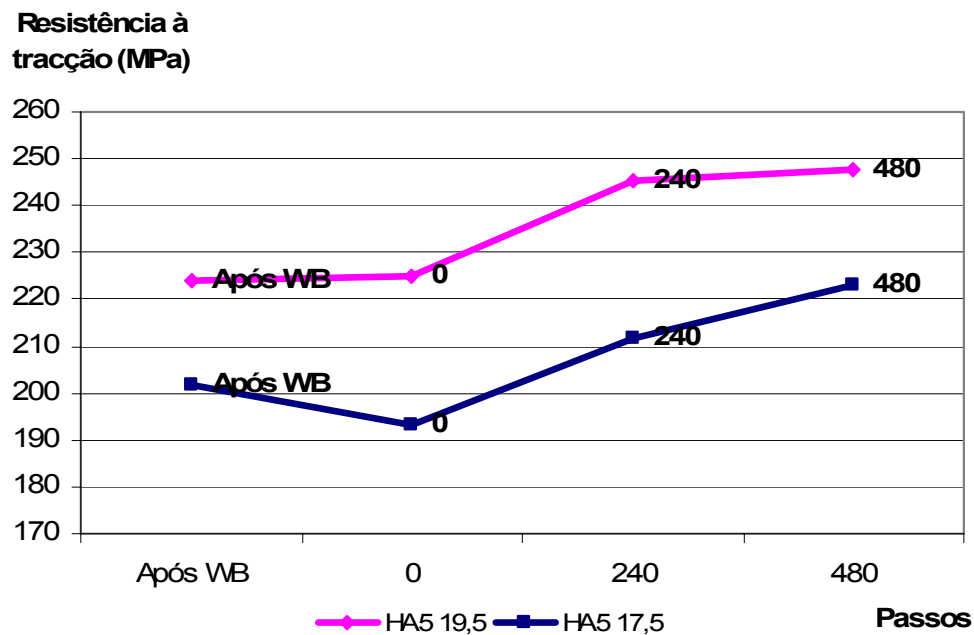


Figura 43 - Evolução da resistência à tracção dos fios HA5 19,5 e 17,5 μm , desde wirebond até 480 horas de HTS (180°C)

Após as 240 horas de HTS, ambos os fios têm um aumento na ordem dos 8,5%: 8,3% para o fio 19,5 μm e de 8,7% para o fio 17,5 μm . Após 480 horas, o fio 17,5 μm continua com um aumento mais acentuado que o fio 19,5 μm , sendo de 5% contra 1%. No entanto, analisando a evolução geral da resistência a tracção desde o processo *wirebond* até às 480 horas de HTS ambos os fios tiveram um aumento de 9,5% para o fio 17,5 μm e de 8,3% para o fio 19,5 μm .

Não foi possível avaliar a resistência ao corte do fio 19,5 μm durante o processo de qualificação do fio e efectuar a comparação com o fio de 17,5 μm , devido a alteração da altura da bola tal como referido anteriormente. Pelo mesmo motivo também não foi efectuado o teste após *wirebond* para o fio 17,5 μm .

O gráfico da figura 44 foi elaborado com base no gráfico do Anexo C que apresenta a evolução das forças médias com a exposição a 180°C. Este gráfico

apresenta os resultados da resistência ao corte do fio 17,5 µm após a cura de *mold* e ciclo térmico de brasagem de *ball-attach* até as 480 horas de HTS. Tal como verificado para os outros fios, houve uma diminuição da resistência com a exposição a temperatura elevada. Constatase que nas primeiras 240 horas de exposição a 180°C, os valores diminuem em 10% de 102 MPa (18,2 gf) para 92 MPa (16,4 gf) e das 240 horas até às 480 houve uma diminuição de 5,5% atingindo o valor de 87 MPa (15,5 gf). Todos os valores cumprem a especificação (3 gf).

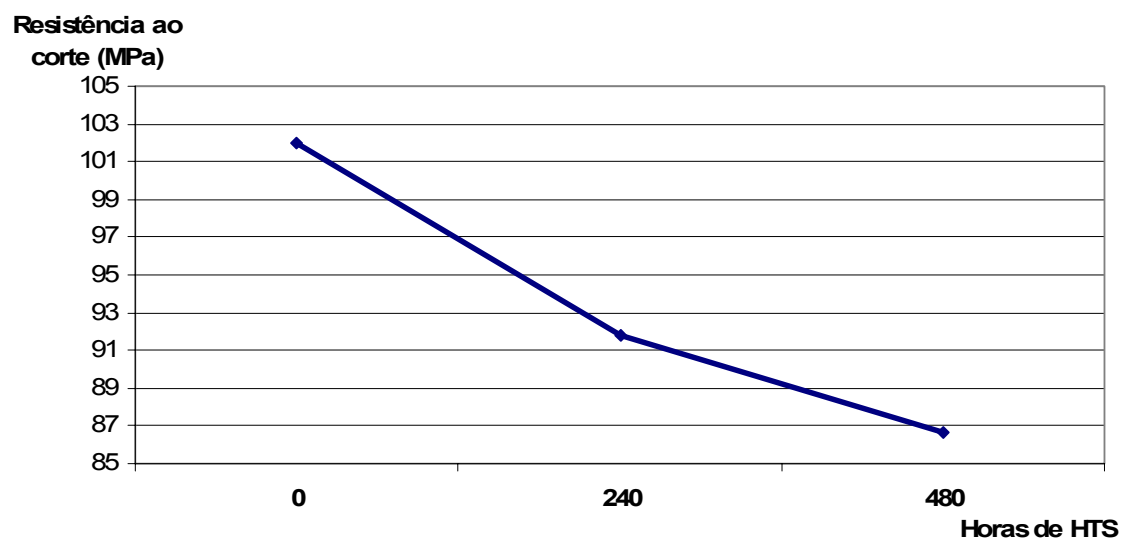


Figura 44 - Evolução da resistência ao corte do fio HA5 com diâmetro de 17,5 µm com a exposição a 180°C.

Desta experiência conclui-se que para processar o fio de 17,5 µm é necessário aumentar o comprimento da cauda de forma a garantir o volume de ouro necessário para formar a bola e diminuir os parâmetros da descarga eléctrica (tempo e intensidade) devido a rápida dissipação de calor ao longo do fio de diâmetro menor. Para as próximas avaliações diminuir-se-á na mesma a descarga eléctrica no entanto manter-se-á o tempo constante e diminuir-se-á a intensidade da corrente.

Podemos salientar que a bibliografia relata que para manter um diâmetro da FAB, utilizando um fio de menor diâmetro, é necessário aumentar a descarga EFO, o que não se verificou neste trabalho em que se optou por aumentar o comprimento da cauda do fio. De facto, ao diminuir a descarga eléctrica, a zona afectada pelo calor diminui, o que permite formar arcos mais curtos. A

redução do diâmetro do fio de 19,5 μm para 17,5 só teve impacto no primeiro passo do processo de *wirebond*. É de notar que para futuras experiências (qualificação do fio) com o fio HA5 17,5 μm , é aconselhável processar com um capilar adequado ao diâmetro do fio, garantido uma folga otimizada para a formação do arco.

Ambos os fios apresentaram ótimos resultados de cobertura de intermetálicos, sempre superior a especificação, no entanto o fio 19,5 apresentou uma área de intermetálicos 7% superior à do fio 17,5 tanto após *wirebond* como após a cura de *mold* e ciclo térmico de *ball-attach*. É de salientar, tal como constatado na experiência com os fios de 23,5 μm de diâmetro, que não se verificaram diferença de cobertura de intermetálicos entre o processo *wirebond* e a cura de *mold* e simulação de *ball-attach*.

Com base nas imagens MEV das secções da 1ª ligação, podemos concluir que o fio 17,5 μm tem mais poros que o fio 19,5 μm após HTS embora sempre cumprindo a especificação.

Através do gráfico da figura 43, verificamos que o aumento do diâmetro do fio aumenta a resistência à tracção, de facto observou-se uma diferença média após *wirebond* de 22 MPa entre a resistência do fio de diâmetro de 19,5 μm e a do 17,5 μm . A diferença em termos de força de rotura à tracção é de 1,8 gf. A cura de *mold* e o ciclo térmico de brasagem de *ball-attach* têm um impacto negativo na resistência à tracção do fio de 17,5 μm , que não ocorreu para o fio 19,5 μm . Podemos lembrar que para o fio GFC 23,5 μm o aumento foi de 1,3%. Estes resultados indicam que os processos de cura de *mold* e simulação de *ball-attach* têm um impacto negativo na resistência do fio de menor diâmetro. É também de salientar que após 240 e 480 horas de HTS, a resistência do fio de 17,5 μm teve um aumento superior ao verificado no fio de 19,5 μm , e nos fios de 23,5 μm que o aumento observado foi de aproximadamente 1% contra 5% para o 17,5 μm . De facto, para fios mais finos, as tensões internas provenientes do processo de *wirebond* libertam-se com maior velocidade que no caso de fios com maior diâmetro.

Os ensaios da resistência ao corte permitem concluir que a resistência ao corte também diminuiu durante as 480 horas de HTS, cerca de 15% e podemos realçar que o fio HA5 17,5 μm teve uma diminuição menos acentuada que o

fio GFC de 23,5 μm (25%), também avaliado neste trabalho. Os resultados da resistência ao corte, após *wirebond*, mostram que resistência da bola da 1ª ligação efectuada com o fio HA5 17,5 μm é 8 MPa inferior a do fio HD5 23,5 μm , utilizado na produção, e 23 MPa do fio HA5 19,5 μm (fio em qualificação).

4.2.2. Validação do funcionamento do fio HA5 17,5 μm

Os valores dos testes de controlo após *wirebond*, como apresenta a tabela 15, são muito próximos dos valores obtidos durante a validação do processo *wirebond*.

Tabela 15- Valores médios dos testes de controlo após *wirebond*

Teste de tracção (gf)	Diâmetro da bola (μm)	Altura da bola (μm)
5,0	47,1	9,6

O resultado da radiografia efectuada após o processo de *mold* não revelou qualquer defeito de fios deitados.

A tabela 16 apresenta os resultados de *Burn In* e dos testes eléctricos a altas (U4) e baixas temperaturas (U2).

Tabela 16- Resultados do teste de Burn In e dos testes eléctricos à baixa (U4) e alta temperatura (U2)

Testes	Burn In	U4	U2
Quantidades testadas	1673	1428	1402
Proporção de componentes que passaram	A percentagem de componentes que falharam os testes está dentro do valor aceitável de produção		

As quatro ligações analisadas em MEV não revelaram presença de porosidades antes nem após PRECON e HTS240. No entanto, o teste de PRECON e armazenamento à alta temperatura durante 480 horas causaram a formação de uma quantidade considerável de poros como se pode verificar na figura 45. Os resultados do somatório dos comprimentos sem poros (10,7; 14,5; 15,6 e 17,8 μm) estão sempre acima do valor mínimo especificado de 10 μm .

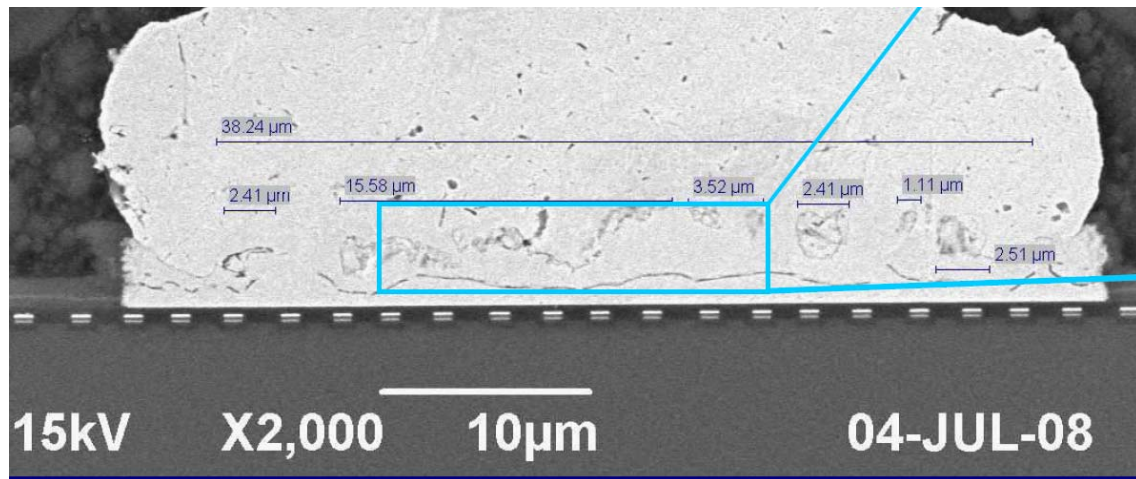


Figura 45 - Secção transversal da bola da 1ª ligação após HTS480 do fio HA5 17,5 µm

A tabela 17 apresenta um resumo dos resultados do ensaio de resistência à tracção obtidos após PRECON e 480 horas de HTS, é de salientar que todos os fios testados partiram pelo fio e que o valor médio é igual ao valor da força de rotura após *wirebond*.

Tabela 17- Resultados do ensaio de tracção após PRECON e HTS480

Valor máximo (gf)	Valor mínimo (gf)	Valor médio (gf)	Quantidade de fios vs tipo de fractura
5,6	4,4	5,0	100 - fractura pelo fio

Após o ensaio de fadiga TC500, três das quatro secções analisadas, não revelam a existência de grandes poros e uma revelou a existência dum poro que não põe em causa a validação do fio para este teste.

Em relação as observações das secções após o ensaio de resistência à oxidação µHAST264, três não apresentaram nenhum poro e uma apresentou poros que não afectam o cumprimento da especificação.

Os testes eléctricos efectuados após os ensaios de fiabilidade não revelaram falhas relacionadas com o fio de ouro, foram todas justificadas por problemas de fabrico do *chip*.

Com base na observação das radiografias dos componentes após o processo de *mold*, podemos concluir que o fio HA5 resistiu a pressão de injeção do termoendurecível, todos os fios mantiveram a forma após *mold*.

Os resultados de Burn In e dos testes eléctricos não revelaram anomalias relacionadas com o diâmetro do fio.

Os cortes longitudinais das ligações antes de PRECON, após PRECON e HTS240 mostraram óptimos resultados sem porosidade e com um crescimento homogéneo dos intermetálicos. Os poros foram detectados unicamente após PRECON e 480 horas de HTS, no entanto as medições dos comprimentos isentos de poros tiveram valores acima do critério. O menor valor foi de 10,7 μm e não teve impacto negativo na resistência mecânica. O teste de tracção após PRECON e 480 de HTS, revela que a ligação mantém a mesma qualidade após o processo *wirebond*. De facto a ligação efectuada, com este fio, resistiu aos 5 ciclos térmicos assim como aos 10 ciclos térmicos de simulação do processo de soldadura em módulos.

Os ensaios após PRECON e TC500 revelaram óptimos resultados não tendo sido visualizadas fissuras nem poros que comprometam o critério de validação. A observação das secções longitudinais das ligações após PRECON e 264 horas de μHAST mostraram a presença de poros finos, o somatório dos comprimentos sem poros não compromete a validação do funcionamento do fio.

Conclui-se que o fio HA5 de 17,5 μm de diâmetro resistiu a todos os testes de fiabilidade efectuados, sendo o PRECON seguido de 480 horas de HTS a 180°C, o teste com mais impacto na integridade da ligação. A diminuição do diâmetro do fio não teve impacto negativo na fiabilidade e na qualidade da ligação. Com base nesta experiência e nos resultados obtidos, o funcionamento deste fio é validado.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste trabalho experimental, podemos concluir que a mudança de fornecedor não tem impacto nos parâmetros do processo de *wirebond*. No entanto, a alteração do diâmetro do fio de ouro implicou o ajustamento de alguns parâmetros para manter as dimensões da área de ligação do fio ao *chip*. Esta alteração dos parâmetros focou-se na formação da bola da 1ª ligação com as mesmas dimensões: a descarga eléctrica foi diminuída de 1,3 mAxms (4,7mAh) e o comprimento do fio fundido aumentou de 20 µm para a diminuição do diâmetro do fio de 19,5 µm para 17,5 µm. Relativamente aos processos de cura de *mold* e o ciclo térmico de brasagem de *ball-attach* podemos concluir que não influenciaram a área de cobertura dos compostos intermetálicos. Os resultados dos ensaios de tracção, após *wirebond*, permitem concluir que a força de rotura à tracção não depende do fornecedor mas é afectada pelo diâmetro do fio: para fios de 23,5 µm a média é de 9,5 gf; de 19,5 µm de é de 7,0 gf; e de 5 gf para o fio 17,5 µm. Durante este trabalho constatamos também que a resistência à tracção aumenta com o armazenamento a alta temperatura, possivelmente devido a libertação de tensões internas provenientes do processo de *wirebond*. Esse aumento depende do fornecedor e do diâmetro: os fios HA5 19,5 e 17,5 µm tiveram um aumento de 8 a 9%, os fios 23,5 µm GFC e HD5 de 3 a 4%. Relativamente a resistência ao corte, conclui-se que esta depende do diâmetro da bola da 1ª ligação e que diminui ao longo do armazenamento a alta temperatura durante as primeiras 480 horas. Esta diminuição depende do fornecedor do fio e está relacionada com a formação de porosidades durante a exposição a alta temperatura. A diminuição da resistência ao corte é mais acentuada durante as primeiras 240 horas. Para os dois novos fios testados verificou-se que a diminuição durante às primeiras 240 horas é o dobro da diminuição sofrida nas 240 horas posteriores.

Relativamente aos testes funcionais, podemos concluir que os fios GFC de 23,5 µm e HA5 de 17,5 µm tiveram comportamentos semelhantes em *Burn In* e nos testes eléctricos. As falhas durante estes testes não foram relacionadas com o fio. O número de falhas estão dentro da proporção aceitável comparando com o dos componentes produtivos montados com o fio HD5 de

23,5.µm de diâmetro. No entanto após o ensaio de PRECON e HTS, o fio GFC de 23,5 µm apresenta péssimos resultados não cumprindo o critério estabelecido, enquanto que o fio HA5 de 17,5 µm não revela a presença de poros. O teste de tracção efectuado após a exposição a 180°C durante 480 horas revela que a ligação se tornou mais fraca para o fio GFC 23,5 que para o fio HA5 17,5 µm. O fio HA5 17,5 µm teve melhor comportamento que o fio GFC 23,5 µm nos ensaios de fadiga térmica e de resistência a oxidação.

O fio HA5 de 17,5 µm de diâmetro cumpre todos os critérios de aceitação enquanto que o fio GFC 23,5 µm falhou o critério do somatório dos comprimentos sem poros logo após PRECON e 240 horas de HTS, e como tal poderá não ser um fio a considerar em qualificações futuras de fios de ouro. É de salientar que dos ensaios de fiabilidade efectuados neste trabalho, o ensaio de PRECON seguido do armazenamento a 180°C foi o ensaio com mais impacto na integridade da bola da 1ª ligação. O teste de fiabilidade com menos impacto foi o teste de resistência à oxidação.

6. RECOMENDAÇÕES

Na continuação deste trabalho, seria pertinente determinar a composição química dos fios GFC e HA5, de forma a compreender a razão do aumento de porosidades.

Seria importante determinar a natureza dos compostos intermetálicos presentes na ligação do *pad* de alumínio com o fio de ouro, de forma a relacionar a formação das porosidades com o tipo de composto intermetálico.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Cardoso André, *“Back-end - Assembly of FBGA semiconductor components”*, Documento interno da Qimonda Portugal SA, 2007.
- [2] - Felix José, *“Introduction to the Burn In”*, Documento interno da Qimonda Portugal SA, 2007.
- [3] - Shankara K. Prasad, *“Advanced Wirebond Interconnection Technology”*, Edição de Springer, 2004, capítulo 2 e 4.
- [4] - George G. Harman, *“Wire Bonding in Microelectronics: Materials, Processes, Reliability, and Yield”*, Edição de McGraw-Hill Professional, 1997, capítulo 3, 4 e 5.
- [5] - Xueren Zhang, Tong Yan Tee, *“Numerical and experimental correlation of high temperature reliability of gold wire bonding to intermetallics (Au/Al) uniformity”*, Thin solid films 504 (2006) 355-361.
- [6] - Hongjun Ji, Mingyu Li, Chunqing Wang, Han Sur Bang , Hee SeonBang, *“Comparision of interface evolution of ultrasonic aluminium and gold wire wedge bonds during thermal aging”*, Material Science and Engineering A 447 (2007) 111-118.
- [7] - Muralli S., *“Formation and growth of intermetallics in thermosonic wire bonds: Significance of vacancy - solute binding energy”*, Journal of alloys and compounds 426 (2006) 200-204.
- [8] - Daniel T. Rooney, DeePak Nager, David Geiger, Dongkai Shanguan, *“Evaluation of wire bonding performance, process conditions, and metallurgical integrity of chip on board wire bonds”*, Microelectronics Reliability 45 (2005) 379-390.
- [9] - <http://privatewww.essex.ac.uk/~bolat/Wirebonding.html>, acedido em Junho 2008.
- [10] - <http://www.siliconfareast.com/rel.html>, acedido em Março 2008.
- [11] - <http://www.jedec.org/download/search/22a113e.pdf>, acedido em Março 2008.

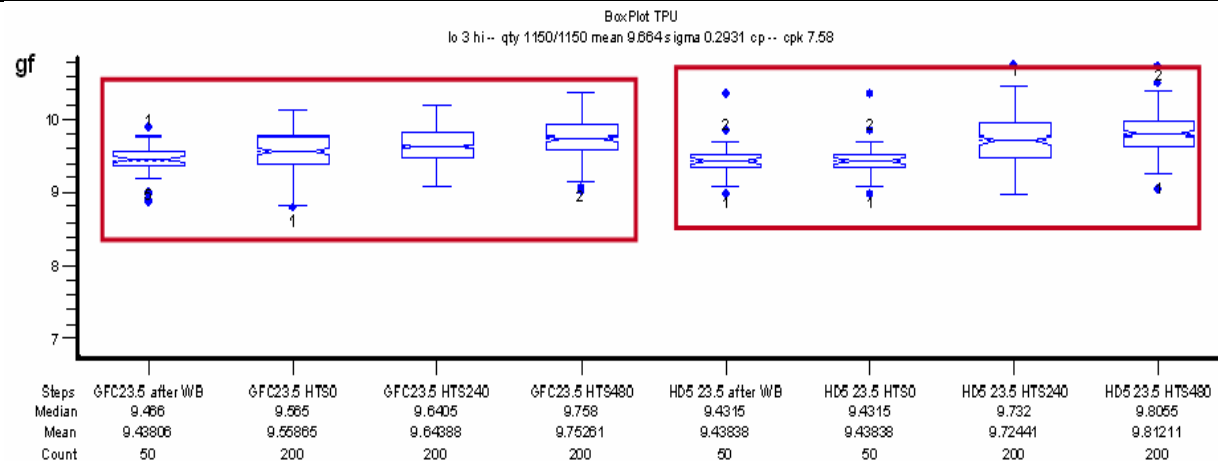
[12] - <http://www.jedec.org/download/search/22a104c.pdf>, acedido em Março 2008.

[13] - <http://www.jedec.org/download/search/22a118.pdf>, acedido em Março 2008.

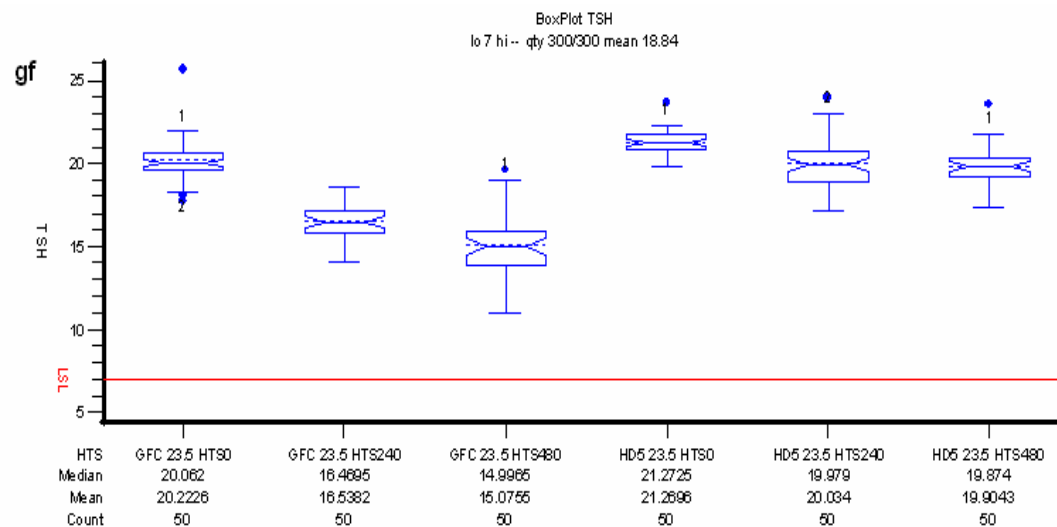
[14] - <http://www.siliconfareast.com/HTS.htm>, acedido em Fevereiro 2008.

[15] - <http://www.jedec.org/download/search/22a103c.pdf>, acedido em Março 2008.

ANEXO A: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRACÇÃO E DE CORTE PARA OS FIOS GFC E HD5 DE 23,5 μ M DE DIÂMETRO



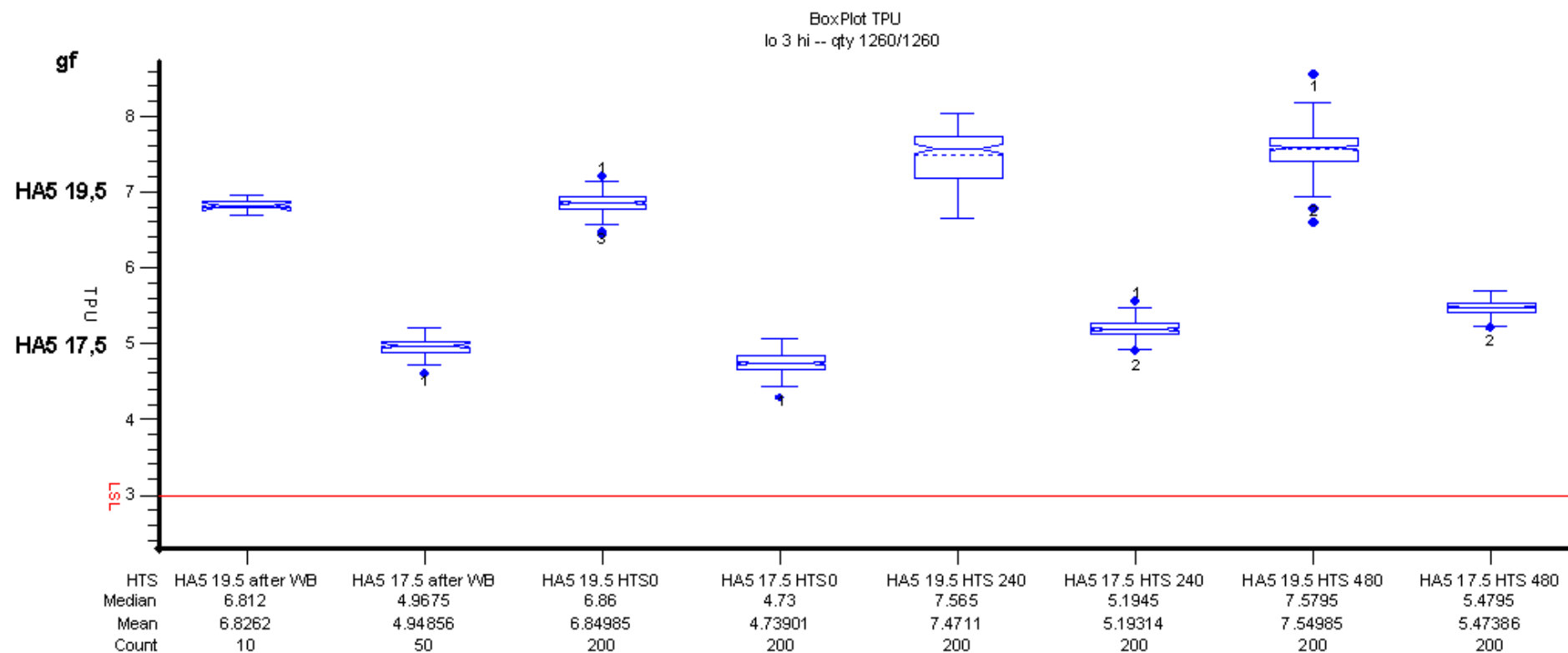
a)



b)

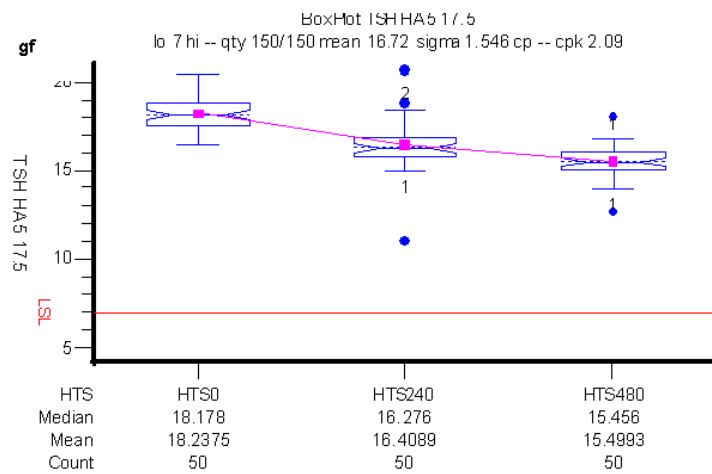
Anexo A - Resultados do ensaio de tracção a) e do ensaio de corte b)
das ligações efectuadas com os fios de diâmetro 23,5 μ m: para o fio GFC (à esquerda); para o fio HD5 (à direita)

ANEXO B: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRACÇÃO PARA OS FIOS HA5 DE 19,5 E 17,5 µM DE DIÂMETRO



Anexo B: Resultados da força à tracção a) das ligações para os fios HA5 19,5 e 17,5 µm;
e da força ao corte b) das ligações efectuadas com o fio 17,5 µm

ANEXO C: RESULTADOS DO ENSAIO DE CORTE PARA O FIO HA5 17,5 μM



Resultados da evolução da força de corte com a exposição a 180°C